

Diplomarbeit

Entwicklung einer Methodik zur Ableitung und Bewertung von Teleoperationsszenarien für automatisierte Verkehrssysteme

eingereicht an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik
der Westsächsischen Hochschule Zwickau
am 17.08.2026

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: **cand. Ing. S c h w a r t n e r , M a r k u s** geb. am: 19.06.2003

Studiengang Kraftfahrzeugtechnik
Schwerpunkt Kraftfahrzeugmechatronik

Ausgegeben von:	Prof. Dr. -Ing. Elena Queck
Erstbetreuer:	Prof. Dr. -Ing. Elena Queck
Zweitbetreuer:	Prof. Dr. -Ing. Christian T. Erbsmehl

Autorenreferat

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik zur Ableitung und Bewertung von Szenarien für die Teleoperation automatisierter Verkehrssysteme entwickelt. Der besondere Fokus liegt auf der systematischen Identifikation und Bewertung von Anwendungsfällen für den Einsatz teleoperativer Eingriffe. Im Verlauf der Arbeit wurden zahlreiche Methoden analysiert, die sich mit der Identifikation und Definition von Anwendungsszenarien beschäftigen. Einen besonderen Einfluss hat hierbei die PEGASUS Methodik aus einem geförderten Projekt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Forschung. Des Weiteren wurden Fachliteraturen und internationale Normen ausgewertet, um Bewertungsansätze zu gewinnen. Des Weiteren bildet diese Ausarbeitung eine Fortsetzung der vorhergegangenen Forschung zum Themenbereich der Teleoperation, die mit einer Studienarbeit begann und sich mit einer Tätigkeit als Studentische Hilfskraft fortsetzte. Im Verlauf dieser Arbeiten wurde an der Westsächsischen Hochschule Zwickau ein Teleoperationsarbeitsplatz aufgebaut. In Verbindung damit wurde ein Teleoperationssystem entwickelt, mit dem zuerst ein Modellauto und im weiteren Verlauf zwei Modellzüge teleoperiert werden konnten. Innerhalb dieser Arbeit sollen Einflussgrößen, die auf die Teleoperation wirken, untersucht werden. In Verbindung damit wird das entwickelte Teleoperationssystem vorgestellt. Die vorliegende Arbeit soll zudem darauf aufmerksam machen, welchen erheblichen Forschungsbedarf die Entwicklung teleoperativer Systeme eröffnet.

Abstract

This thesis develops a methodology for deriving scenarios for the teleoperation of automated traffic systems. A particular focus is placed on the systematic identification and evaluation of use cases for teleoperative interventions. Numerous methods concerned with the identification and definition of application scenarios were analyzed during the course of the work. The PEGASUS methodology, derived from a project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Research, was particularly influential in this regard. Furthermore, specialist literature and international standards were evaluated to establish approaches for assessment. This thesis also builds upon previous research into teleoperation, which began with a student research thesis and continued through work as a student research assistant. As part of these activities, a teleoperation workstation was set up at the University of Applied Sciences Zwickau. In conjunction with this, a teleoperation system was developed that enabled the teleoperation of a model car initially, and subsequently, two model trains. This thesis examines the factors influencing teleoperation and presents the developed teleoperation system. Finally, the work aims to highlight the significant need for further research created by the development of teleoperative systems.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form in noch keiner anderen Prüfung vorgelegen hat. Mir ist bewusst, dass ich Autor/in der vorliegenden Arbeit bin und volle Verantwortung für den Text trage. ☒

Ich erkläre, dass ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken – dazu gehören auch Internetquellen – übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht und die entsprechenden Quellen angegeben habe. ☒

Mir ist bewusst, dass meine Arbeit auf Plagiate überprüft werden kann. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Prüfungsordnung geahndet werden. ☒

Zusätzlich versichere ich, dass ich auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Werkzeuge nur in Absprache mit den Prüfern verwendet habe. Dabei stand meine eigene geistige Leistung im Vordergrund, und ich habe jederzeit den Prozess steuernd bearbeitet. ☒

Diese Werkzeuge habe ich im Quellenverzeichnis in der Rubrik „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ mit ihrem Produktnamen und einer Übersicht des im Rahmen dieser Prüfungs-/Studienarbeit genutzten Funktionsumfangs unter Angabe der Textstelle in der Arbeit vollständig aufgeführt. ☒

Ich versichere, dass ich keine KI-basierten Tools verwendet habe, deren Nutzung die Prüfer explizit schriftlich ausgeschlossen haben. Ich bin mir bewusst, dass die Verwendung von Texten oder anderen Inhalten und Produkten, die durch KI-basierte Tools generiert wurden, keine Garantie für deren Qualität darstellt. ☒

Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate. ☒

Bad Elster, 17.08.2026

M. Schwarzer

Ort, Datum

Unterschrift

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich einen besonderen Dank an meine betreuende Dozentin, Prof. Dr. -Ing. Elena Queck, richten. Sie ermöglichte mir die Bearbeitung des Themas der vorliegenden Arbeit. Die Zusammenarbeit begann bereits in einer Studienarbeit und einer fortführenden Tätigkeit als studentische Hilfskraft. Ich konnte im regelmäßigen Kontakt jederzeit fachliche Expertise entgegennehmen.

Mein Dank gilt ebenso Prof. Dr. Ing- Christian T. Erbsmehl, der mir als zweiter Betreuer zur Verfügung stand.

Darüber hinaus möchte ich M. Sc Peter Huster meinen Dank aussprechen, der seit Beginn meiner Forschung im Themenbereich der Teleoperation stets hilfsbereit zur Verfügung stand.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Westsächsischen Hochschule, die mir stets im Prozess der Diplomarbeit, in fachlichen und organisatorischen Angelegenheiten hilfsbereit zur Verfügung standen.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner Familie, die meinen Bildungsweg von Beginn an mit Verständnis, Geduld und Rückhalt unterstützt hat.

Markus Christoph Schwartner

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	III
Verzeichnis der Tabellen	VI
Abkürzungen und Formelzeichen	VII
Begriffserläuterung	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Wissenschaftliche Grundlagen	4
2.1 Automatisierte Verkehrssysteme	4
2.2 Einordnung und Abgrenzung Teleoperation	7
2.3 Struktur von Szenen, Situationen und Szenarien	8
2.3.1 Begriffe: Szene, Situation und Szenario	8
2.3.2 Ebenen der Szenario -Beschreibung	14
2.4 Systemgrenzen automatisierter Verkehrssysteme	17
2.5 Operational Design Domain (ODD)	19
3 Stand der Forschung	21
3.1 Szenarien -basierte Entwicklung	21
3.2 Methoden der Szenario Generierung	24
3.3 Szenariobewertung und Reduktion	34

4	Methodik zur Ableitung und Bewertung teleoperationsrelevanter Anwendungsfälle	39
4.1	Abgrenzung des Betrachtungsraums	39
4.2	Identifikation teleoperationsrelevanter Anwendungsfälle	41
4.3	Ableitung der teleoperativen Anwendungsfälle und Szenarien	52
4.4	Allgemeine Plausibilisierung und Szenario-Bildung	59
4.5	Bewertungsansatz mittels Risikograph	63
5	Untersuchung Einflussgrößen Teleoperation.....	76
5.1	Entwicklung und Aufbau des Teleoperationsdemonstrators	76
5.2	Experimentelle Untersuchung optischer Sichtbeeinträchtigungen	80
5.3	Ergebnisse des Versuchs	82
6	Diskussion.....	89
6.1	Diskussion der Identifikation.....	89
6.2	Diskussion der Plausibilitätsprüfung und Szenario Bildung.....	90
6.3	Diskussion der Risikobewertung	91
6.4	Grenzen und Übertragbarkeit der entwickelten Methodik	93
6.5	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	94
7	Fazit und Ausblick	96
8	Literaturverzeichnis.....	98
9	Anhang	101

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1 – Marktgröße autonomer Fahrzeugmarkt - eigene Darstellung in Anlehnung an (GrandViewResearch, 2026).....	4
Abbildung 2 – Szene – eigene Darstellung in Anlehnung an (Ulbrich, et al., 2015 S. 3)	9
Abbildung 3 – Szene Illustration (Ulbrich, et al., 2015 S. 4).....	10
Abbildung 4 – Venn - Diagramm – eigene Darstellung in Anlehnung an (Ulbrich, et al., 2015 S. 7)	11
Abbildung 5 – Situation – eigene Darstellung in Anlehnung an (Ulbrich, et al., 2015 S. 8)	12
Abbildung 6 – Szenario Struktur (Ulbrich, et al., 2015 S. 10)	13
Abbildung 7 – Szenarioaufbau – eigene Darstellung in Anlehnung an (Ulbrich, et al., 2015 S. 9)	14
Abbildung 8 – Funktionales Szenario – eigene Darstellung in Anlehnung an (Bagschik, et al., 2017 S. 8).....	15
Abbildung 9 – Logisches Szenario – eigene Darstellung in Anlehnung an (Bagschik, et al., 2017 S. 8).....	16
Abbildung 10 – Konkretes Szenario – eigene Darstellung in Anlehnung an (Bagschik, et al., 2017 S. 8).....	17
Abbildung 11 – Mengeneinteilung – eigene Darstellung in Anlehnung an (ISO21448, 2022 S. 14)	22
Abbildung 12 – Mengenoptimierung – eigene Darstellung in Anlehnung an (ISO21448, 2022 S. 15)	23
Abbildung 13 – 6-Schichten-Modell für Szenarios (Bock, et al., 2019)	27
Abbildung 14 STPA-Methode - eigene Darstellung in Anlehnung an (Leveson, et al., 2018 S. 15).....	29
Abbildung 15 – Betrachtungsraum – eigene Darstellung.....	40
Abbildung 16 – Identifikationskette Anwendungsfall – eigene Darstellung	42
Abbildung 17 – Identifikationsschema allgemein – eigene Darstellung	43
Abbildung 18 – Identifikation Straßenebene – eigene Darstellung	46
Abbildung 19 – Identifikation Infrastruktur – eigene Darstellung.....	47
Abbildung 20 – Identifikation temporäre Modifikation – eigene Darstellung	48
Abbildung 21 – Identifikation dynamische Elemente – eigene Darstellung.....	49
Abbildung 22 – Identifikation Umweltbedingungen – eigene Darstellung	50
Abbildung 23 – Identifikation digitale Informationen – eigene Darstellung.....	51
Abbildung 24 – Ableitungskette Anwendungsfall – eigene Darstellung	52

Abbildung 25 – Anwendungsfall 1 - Schicht 1 – eigene Darstellung.....	53
Abbildung 26 – Anwendungsfall 2 - Schicht 1 – eigene Darstellung.....	53
Abbildung 27 – Anwendungsfall 3 - Schicht 2 – eigene Darstellung.....	54
Abbildung 28 – Anwendungsfall 4 - Schicht 2 – eigene Darstellung.....	54
Abbildung 29 – Anwendungsfall 5 - Schicht 3 – eigene Darstellung.....	55
Abbildung 30 – Anwendungsfall 6 - Schicht 3 – eigene Darstellung.....	55
Abbildung 31 - Anwendungsfall 7 - Schicht 4 – eigene Darstellung.....	56
Abbildung 32 – Anwendungsfall 8 - Schicht 4 – eigene Darstellung.....	56
Abbildung 33 – Anwendungsfall 9 - Schicht 5 – eigene Darstellung.....	57
Abbildung 34 – Anwendungsfall 10 - Schicht 5 – eigene Darstellung.....	57
Abbildung 35 – Anwendungsfall 11 - Schicht 6 – eigene Darstellung.....	58
Abbildung 36 – Anwendungsfall 12 - Schicht 6 – eigene Darstellung.....	58
Abbildung 37 Szenariobildung – Plausibilitätsprüfung Teil 1 – eigene Darstellung....	60
Abbildung 38 Szenariobildung - Plausibilitätsprüfung Teil 2 – eigene Darstellung	61
Abbildung 39 Szenariobildung und Plausibilisierung Beispiel – eigene Darstellung ..	62
Abbildung 40 – Risikograph - allgemein – eigene Darstellung.....	63
Abbildung 41 – Bewertung Anwendungsfall 3 – eigene Darstellung.....	67
Abbildung 42 – Bewertung Anwendungsfall 6 – eigene Darstellung.....	68
Abbildung 43 – Bewertung Anwendungsfall 9 – eigene Darstellung.....	68
Abbildung 44 – Bewertung Anwendungsfall 16 – eigene Darstellung.....	69
Abbildung 45 – Bewertung Anwendungsfall 19 – eigene Darstellung.....	70
Abbildung 46 – Bewertung Anwendungsfall 24 – eigene Darstellung.....	70
Abbildung 47 – Bewertung Anwendungsfall 28 – eigene Darstellung.....	71
Abbildung 48 – Bewertung Anwendungsfall 36 – eigene Darstellung.....	72
Abbildung 49 – Bewertung - Anwendungsfall 38 – eigene Darstellung	72
Abbildung 50 – Bewertung Anwendungsfall 40 – eigene Darstellung.....	73
Abbildung 51 – Bewertung Anwendungsfall 47 – eigene Darstellung.....	74
Abbildung 52 – Bewertung Anwendungsfall 49 – eigene Darstellung.....	74
Abbildung 53 – Auswertung Anwendungsfälle – eigene Darstellung	75
Abbildung 54 – Teleoperation Zug - Seitenansicht – eigene Aufnahme	77
Abbildung 55 – Teleoperationssystem Zug - Draufsicht – eigene Aufnahme	78
Abbildung 56 – Teleoperationssystem Zug - Schrägansicht – eigene Aufnahme.....	79
Abbildung 57 – Versuchsaufbau - Zeichnung – eigene Darstellung	80
Abbildung 58 – Versuchsaufbau - Kamerabild – eigene Aufnahme.....	81
Abbildung 59 – Blenden Sichtbeeinträchtigung – eigene Aufnahme	81

Abbildung 60 - Montage Blende – eigene Aufnahme	82
Abbildung 61 – Ergebnisse Kamera 1 – eigene Aufnahme	83
Abbildung 62 – Ergebnisse Kamera 2 – eigene Aufnahme	84
Abbildung 63 – Ergebnis Blende 1 - Kamera 2 - Kamera 1 – eigene Aufnahme	86
Abbildung 64 – Ergebnis Blende 2 - Kamera 2 - Kamera 1 – eigene Aufnahme	86
Abbildung 65 – Ergebnis Blende 3 - Kamera 2 - Kamera 1 – eigene Aufnahme	87
Abbildung 66 – Ergebnis Blende 4 - Kamera 2 - Kamera 1 – eigene Aufnahme	87

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1 - Ergebnisse Erkennbarkeit - Kamera 1	83
Tabelle 2 - Ergebnisse Erkennbarkeit - Kamera 2	85
Tabelle 3 - Ergebnisse Vergleich - Kamera 1 - Kamera 2	87

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Erläuterung
MIT	Massachusetts Institut of Technology
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
DDT	Dynamic Driving Task
ODD	Operational Design Domain
PKW	Personenkraftwagen
LKW	Lastkraftwagen
FOT	Field Operational Tests
NDS	Naturalistic Driving Studies
GIDAS	German In- Depth Accident Study
HAZOP	Hazard and Operability Study
HMI	Human-Machine-Interface
ALARP	As Low as Reasonably Practicable
MEM	Minimale endogene Mortalität
GAMAB	Globalement Au Moins Aussi Bon

OEDR	Object and Event Detection and Response
STPA	Systemtheoretische Prozessanalyse
UCA	Unsafe Control Action
HARA	Hazard Analysis and Risk Assessment
DTI	Decision Tree Induction
GNSS	Global Navigation Satellite System
SIL	Sicherheitsintegritätslevel

Begriffserläuterung

Naturalistic Driving Study:

Fahrstudie im natürlichen Realverkehr, bei der das Fahrverhalten unbeeinflusst aufgezeichnet wird.

Fehlerbaumanalyse:

Systematische Untersuchung der Ursachen eines unerwünschten Ereignisses.

Hazard and Operability Study:

Systematische Analyse von Gefährdungen und Fehlfunktionen.

System:

Ein System ist ein Komponentensatz, welcher im Gesamten agiert, um eine Funktion zu erfüllen. Das System kann aus Teilsystemen bestehen und selbst Teil eines größeren Systems sein.

Global Navigation Satellite System:

Ein Überbegriff für satellitengestützte Navigationssysteme.

Prozessmodell:

Eine strukturierte Darstellung eines Ablaufs, wodurch einzelne Prozessschritte sowie deren Reihenfolge und Zusammenhänge beschrieben werden.

1 Einleitung

1.1 Motivation

„Safety is not a property of systems, it is a property of systems in context“. Dieses Zitat bedeutet, dass Sicherheit keine grundlegende Eigenschaft von Systemen an sich sei. Es ist die Eigenschaft von Systemen, die in einen Kontext gebracht wurden. Eine klare Struktur für den Einsatz eines technischen Systems ist somit ausschlaggebend für eine erfolgreiche Entwicklung.

Das Zitat wurde von Nancy Leveson veröffentlicht. Sie ist Professor für Aeronautik und Astronautik am MIT. Professor Leveson führte in ihrem Leben weitreichende Forschung zu den Themen Systemsicherheit, Softwaresicherheit, Software- und Systemtechnik, sowie die Mensch- Maschine- Interaktion (Sunnyday, 2026).

Autonome Fahrzeuge haben das Ziel erhebliche positive Effekte zu ermöglichen. Dazu zählen Ersparnisse in Hinsicht des Kraftstoffes, der Betriebskosten, der Zeit und Gewinne für den Bereich der Sicherheit, wie auch Zugänglichkeit. Aktuelle Initiativen, wie die Fachtagung „Vision 2030: autonomes Fahren im sächsischen ÖPNV“, unterstreichen die Relevanz des Themas. Der Regelbetrieb von selbstfahrenden Fahrzeugen im öffentlichen Personennahverkehr soll bis 2030 im Einsatz sein. Dafür seien politische Rahmenbedingungen, Betriebsmodelle, betriebsstaugliche Systeme und deren methodischen Grundlagen notwendig (Staatskanzlei, 2026). Können Fahrzeuge in der Zukunft, zu jedem Zeitpunkt, fehlerfrei auf den Straßen und Schienen unserer Infrastruktur, ohne menschliche Hilfe agieren? Die fortschreitende Entwicklung und Präsenz von automatisierten Verkehrssystemen führt zu dem Bedarf einer Rückfallebene. Dieser Bedarf entsteht durch Situationen, in denen das Fahrzeug keine weitere eigenständige und sichere Fortbewegung gewährleisten kann. Innere und äußere Faktoren können diese Fehlfunktion auslösen. Das Resultat einer unzureichenden Implementierung der Fahrfunktion ist, dass solche Fahrzeuge von vornherein gewisse Aufgaben nicht eigenständig absolvieren können. Der Eingriff des Menschen zur Lösung des Problems ist als Folge unausweichlich. Die Notwendigkeit der physischen Präsenz direkt am Fahrzeug ist jedoch mit sehr großen wirtschaftlichen Einbußen verbunden.

Die Teleoperation automatisierter Verkehrssysteme soll die geeignete Lösung zur Verfügung stellen. Ein ausgebildeter Mitarbeiter greift aus der Ferne durch eine drahtlose

Verbindung in die Steuerung des Fahrzeuges ein. Das kann direkt oder indirekt erfolgen. Die Menge an möglichen Szenarien für die Notwendigkeit eines solchen Eingriffes ist im jetzigen Stand unendlich.

1.2 Zielsetzung

Diese wissenschaftliche Ausarbeitung soll an den weitreichenden Bedarf methodischer Entwicklung anknüpfen. Die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen sollen durch die Auswertung bestehender Konzepte aus der Fachliteratur zur Verfügung gestellt werden. Mit Hilfe von internationalen Normen sollen strukturelle Vorgehensweisen gefunden werden. Die Arbeit soll diese Strukturen aufgreifen und auf die Thematik erweitern. Durch die eindeutige Definierung, Strukturierung und Eingrenzung von Szenarien wird der Einsatz der Teleoperation kalkulierbar. Richtlinien und regulatorische Vorgaben sollen als Grundlagen für den Bewertungsprozess dienen. Zu den Bewertungskriterien gehören Wirtschaftlichkeit, Verkehrsqualität und Sicherheit. Die gewonnen Erkenntnisse sollen in einer Methodik zur Verfügung gestellt werden. Diese Methodik wird demnach etabliert und anschließend auch angewendet. Dafür werden konkrete Anwendungsfälle abgeleitet und definiert. Anschließend werden diese Anwendungsfälle anhand von relevanten Kriterien bewertet. Durch die Bewertung werden Risiken identifiziert. Aus diesen Risiken sollen geeignete Maßnahmen abgeleitet werden. Eine praktische Untersuchung von relevanten Einflussgrößen soll die Arbeit abschließen. Zukünftige wissenschaftliche Arbeiten sollen an diese Methodik anknüpfen können.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die wissenschaftlichen Grundlagen erläutert. Es soll ein fortlaufendes Verständnis ermöglicht werden. In den ersten beiden Teilabschnitten wird zwischen dem autonomen Fahren und der Teleoperation differenziert. Anschließend werden relevante Grundbegriffe der Szenarien Forschung erläutert. Dazu zählen Situation, Szene und Szenario. Die Begriffe Systemgrenze und der Betriebsbereich werden ebenso definiert.

Unter Gliederungspunkt 3 wird auf den aktuellen Stand der Forschung eingegangen. Der Fokus liegt auf der szenariobasierten Entwicklung. Vorhandene Methoden zur Entwicklung von Szenarien werden analysiert und ausgewertet. Möglichkeiten für die Reduktion und Bewertung dieser Szenarien werden eingeführt.

Im Zentrum der Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, die es ermöglicht relevante Anwendungsfälle der Teleoperation automatisierter Verkehrssysteme zu identifizieren, zu definieren und zu bewerten. Diese Methodik ist in vier Abschnitte gegliedert. Zuerst wird der Betrachtungsraum abgegrenzt. Es soll klar definiert werden unter welchen Zuständen und Systemgrenzen eine Teleoperation in Frage kommt. Infolgedessen wird in Abschnitt zwei das entwickelte Identifikationsschema vorgestellt. Es werden auslösende Ereignisse ermittelt, die maßgeblich für den Bedarf eines teleoperativen Eingriffs sind. Aus einem unendlichen Raum an möglichen Einflüssen entsteht eine klar abgegrenzte Struktur. In Abschnitt drei erfolgt die Ableitung der Anwendungsfälle. Es wird der korrekte zeitliche Ablauf in einer kausalen Kette dargestellt. In Abschnitt vier wird die Plausibilität geprüft und das Szenario gebildet. Im Letzten Schritt der Methodik wird der Anwendungsfall einzeln anhand von ausgewählten Bewertungskriterien eingeordnet.

In Kapitel 5 werden Einflussgrößen auf die Teleoperation experimentell untersucht. In einer reproduzierbaren Untersuchungsumgebung soll der Einfluss von definierten Sichtbeeinträchtigungen auf das entwickelte System nachgewiesen werden.

Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert. Eine umfassende Einordnung der entwickelten Methodik soll eine Aussage darüber geben, bis zu welchen Grenzen ihre Funktionalität gewährleistet werden kann. Die entwickelten Anwendungsbeispiele und untersuchten Einflussgrößen werden diskutiert.

Im Letzten Abschnitt schließt das Fazit diese Forschungsarbeit durch die wichtigsten Erkenntnisse ab. Es soll beantwortet werden, inwiefern das Ziel dieser Arbeit erfüllt wurde. Zukünftige wissenschaftliche Arbeiten sollen an diese Methodik anknüpfen können.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die wissenschaftlichen Grundlagen, welche die Basis dieser Arbeit darstellen, erläutert werden. Zu diesen Grundlagen gehören Begriffsdefinitionen und Erläuterungen zu automatisierten Verkehrssystemen, der Teleoperation und der Szenarioforschung. Im ersten Kapitel wird das Potential und die Stufen der Automatisierung definiert. Im zweiten Kapitel wird die Teleoperation eingeordnet. Im dritten Kapitel werden die Grundbegriffe der Szenarioforschung, wie die Einteilung in Szene, Situation und Szenario betrachtet. In den letzten beiden Gliederungspunkten werden zwei ausschlaggebende Elemente automatisierter Fahrzeuge hervorgehoben. Dazu gehören die Systemgrenzen und der Betriebsbereich (ODD). Die wissenschaftlichen Grundlagen sollen ein durchgehendes Verständnis über den gesamten Verlauf dieser Arbeit gewährleisten.

2.1 Automatisierte Verkehrssysteme

Automatisierte Systeme gehören zu den relevantesten Entwicklungsrichtungen des 21. Jahrhunderts. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Entwicklung von selbstfahrenden Fahrzeugen, die im Verkehr teilnehmen. Die weltweite Marktgröße verzeichnet mittlerweile ein stabiles Wachstum. Es sollen durchschnittliche jährliche Wachstumsraten von 20% auftreten. Zu den größten Aktionären gehören Nordamerika, Europa, Asien, Latein Amerika und der Mittlere Osten, sowie Afrika.

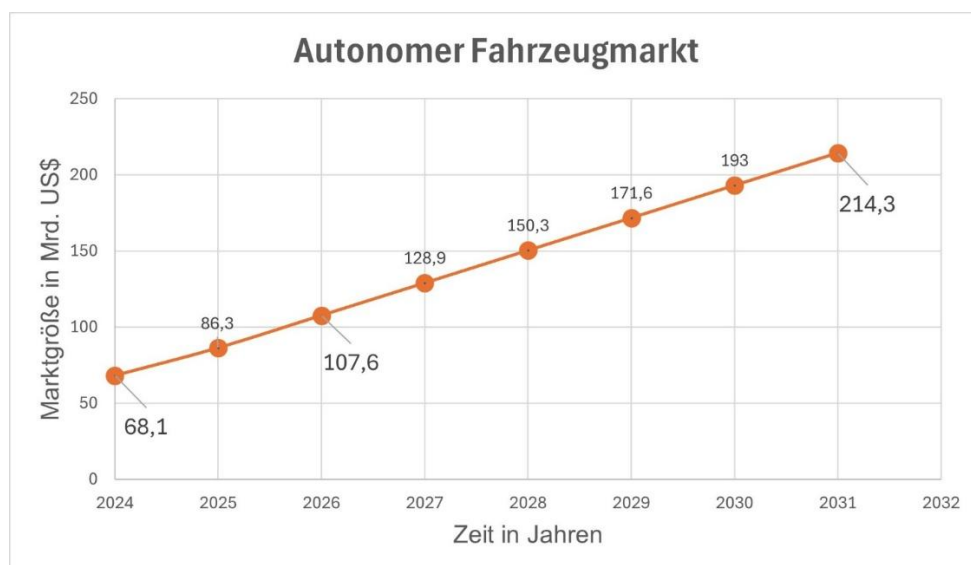


Abbildung 1 – Marktgröße autonomer Fahrzeugmarkt
 - eigene Darstellung in Anlehnung an (GrandViewResearch, 2026)

In Abbildung 1 ist ein Diagramm dargestellt, welches durch die „Grand View Research“ abgeleitet wurde. Es zeigt die Entwicklung des autonomen Fahrzeugmarktes. Die vertikale Achse definiert die Marktgröße in Milliarden US\$. Die horizontale Achse repräsentiert den zeitlichen Verlauf in Jahren. Der Marktwert betrug im Jahr 2024 einen Wert von 68,1 Milliarden US\$. Nordamerika hatte 2024 den größten Anteil. Der Raum Asien verzeichnet das größte Wachstum. Die Prognose sagt bis 2031 einen Wert von 214,3 Milliarden US\$ voraus. Dieses Wachstum unterstreicht die Relevanz automatisierter Systeme und die intensiven Entwicklungsaktivitäten. Komplexere Ausstattungen des Fahrzeuges in Hinsicht der Hardware und Software entwickeln zusätzliche Kosten. Eine Optimierung der Verkehrsabläufe soll erhebliche Effizienzsteigerungen zur Folge haben. Aus diesen Steigerungen resultieren sehr hohe Einspareffekte. Es steigen dadurch Akzeptanz, Nutzungsbereitschaft und Attraktivität automatisierter Systeme. Die positive Beeinflussung wird durch geringere Kosten im Betrieb, Personal und Instandhaltung deutlich. Das automatisierte Fahren im Schwerlastverkehr in Kolonnen (Platooning) soll eine Einsparung des Kraftstoffes bis 10% ermöglichen (KE-CONSULT, 2018 S. 16). Im Personenverkehr wird mit einer Einsparung des Treibstoffes bis 20% gerechnet. Diese Schätzungen sind mit dem Betrieb auf Autobahnen verbunden (KE-CONSULT, 2018 S. 22). Im städtischen Bereich wird mit einer Einsparung des Kraftstoffes bis zu 31% gerechnet (KE-CONSULT, 2018 S. 23). Ein effizienterer Energieverbrauch wirkt sich ebenso positiv auf eine sinkende Belastung des Ökosystems aus. Die Potentiale dieser Technologie sind maßgeblich mit der konkreten Stufe der Automatisierung verbunden. Die bekannteste Einteilung automatisierter Systeme wird mit der SAEJ3016 zur Verfügung gestellt. Es erfolgt eine Definierung von sechs Stufen.

Keine Automatisierung:

Die Stufe 0 beschreibt ein Fahrzeug, dass ausschließlich durch einen Fahrer gesteuert wird. Der Fahrer übernimmt die gesamte dynamische Fahraufgabe. Aktive und passive Sicherheitssysteme sind vorhanden (SAE_International, 2021 S. 30).

Assistierende Funktionen:

Die Stufe 1 ermöglicht den Eingriff in die laterale oder longitudinale Fahrzeugbewegung. Dieser Eingriff ist nur begrenzt möglich. Es kann zu Ereignissen kommen, die weder wahrgenommen oder unterstützt werden können. Der Fahrer ist zu jeder Zeit für die Längs- und Querverführung des Fahrzeuges verantwortlich. Unter fortgeschrittene Assistenzsysteme werden die Kollisionswarnung, der Spurhalteassistent, der Notbremsassistent und Einparkhilfen eingeordnet (SAE_International, 2021 S. 30-31).

Teilautomatisierung:

Fahrzeuge, die in Stufe 2 eingeordnet werden, können eigenständig in die Längs- und Querrführung eingreifen. Diese Stufe wird als teilautomatisiert bezeichnet. Der Fahrer trägt zu jeder Zeit die Verantwortung über die Bewegung des Fahrzeuges. Er muss das Fahrzeug weiterhin dauerhaft überwachen, gegebenenfalls Manöver bestätigen oder eingreifen (SAE_International, 2021 S. 31).

Bedingt automatisiert:

Die Stufe 3 wird als bedingt automatisiert bezeichnet. Das Fahrzeug kann die gesamte Fahraufgabe in einem festen Betriebsbereich übernehmen. Eine aktive Überwachung der Bewegung ist nicht notwendig. Der Fahrer muss zu jeder Zeit für Ausfall- und Interventionsanforderungen durch das automatisierte System aufnahmebereit sein (SAE_International, 2021 S. 31).

Hohe Automatisierung:

Ein Fahrzeug, das in jeder Situation innerhalb eines festgelegten Betriebsbereichs eigenständig agieren kann, wird der SAE-Stufe 4 zugeordnet. Der Benutzer muss das Fahrzeug weder überwachen, oder für einen Eingriff bereit sein. Vor dem Verlassen des ODD kann der Nutzer die Fahrzeugführung übernehmen. Das Fahrzeug kann sich vor Verlassen des Betriebsbereichs, oder der Durchquerung einer unlösbaren Fahraufgabe, in einen risikominimalen Zustand versetzen (SAE_International, 2021 S. 31-32).

Volle Automatisierung:

Die SAE-Stufe 5 definiert die volle Automatisierung. Es sind keine konstruktionsbedingten Einschränkungen in Hinsicht der Umfeldbedingung oder der geografischen Lage vorhanden. Das Fahrzeug kann in jeder Situation eigenständig agieren. Es ist keine Überwachung oder ein Eingriff erforderlich. Bedingungen, die nicht konstruktiv lösbar sind, können zu einem Rückfall in einem risikominimalen Zustand führen. In diese Kategorie werden Schneestürme, Glatteis und Überflutungen eingeordnet (SAE_International, 2021 S. 32).

In einer Rede in Austin Texas im März 2016 gab der Projektleiter für selbstfahrende Fahrzeuge der Firma Google eine Prognose zu deren Entwicklungsstand. Es stellte sich die Frage, wann selbstfahrende Fahrzeuge für den privaten Gebrauch verfügbar sein werden. Nach den aktuellen Papers könnten es drei oder sogar dreißig Jahre sein. Er schätze es sei irgendwo dazwischen (GOMES, 2016 S. 15).

2.2 Einordnung und Abgrenzung Teleoperation

Die Zugabe von Informationen und Befehlen, oder die Steuerung des Fahrzeugs von außerhalb, wird als Teleoperation definiert. Es wird in die indirekte und die direkte Teleoperation unterteilt. Die indirekte Teleoperation wird auch als Teleassistenz bezeichnet. Die direkte Teleoperation wird analog als Telefahren bezeichnet. Es wird zwischen geplanter und ungeplanter Teleoperation unterschieden. Vorhersehbare Ereignisse erzeugen eine geplante Teleoperation. Unerwartete Ereignisse lösen eine ungeplante Teleoperation aus. Das Fahrzeug wird von einer Person aus der Ferne unterstützt, die keine direkte Sicht auf das Fahrzeug hat. Diese Person wird als Teleoperator bezeichnet. Die Unterstützung erfolgt von einem Leitstand. Dieser Leitstand ist mit Eingabe und Ausgabeschnittstellen ausgestattet. Eingabeschnittstellen können Tastaturen, Joysticks, Pedale, oder ein Lenkrad sein. Die Ausgabeschnittstellen sind zum Beispiel Bildschirme, Lautsprecher und Komponenten mit haptischer Rückmeldung. Die haptische Rückmeldung bezieht sich zum Beispiel auf den Einsatz von Vibrationen zur Signalisierung von Unebenheiten auf der Fahrbahn.

Indirekte Teleoperation

Die indirekte Teleoperation beschreibt eine unterstützende Zugabe von Informationen und Befehlen durch eine räumlich entfernte Person. Es soll die Weiterfahrt durch das automatisierte System ermöglicht werden. Die Ausführung der Fahraufgabe wird nicht an die teleoperierende Person abgegeben. Die Unterstützung erfolgt bei Fahraufgaben, die das System nicht eigenständig lösen kann (SAE_International, 2021 S. 18). Hiermit wird zum Beispiel ein Verlassen des Betriebsbereichs assoziiert. Der Betriebsbereich wird in Kapitel 2.5 eingeordnet. Solche Ereignisse können bekannt und somit geplant, sowie unbekannt und ungeplant sein. Eine unangekündigte Baustelle kann den Bedarf einer Unterstützung auslösen. Der Teleoperator gibt eine neue Route vor, die um die unbefahrbare Zone herumführt (SAE_International, 2021 S. 19). Analog kann die Baustelle zuvor bekannt sein und vor Fahrtantritt eine Route durch den Teleoperator geplant werden.

Direkte Teleoperation

Die direkte Teleoperation definiert die teilweise oder gesamte Ausführung der Fahraufgabe. Der Teleoperator übernimmt die komplette Längs- und Querführung. Es wird beschleunigt, verzögert und gelenkt. Die direkte Teleoperation kann geplant und ungeplant sein. (SAE_International, 2021). Starke Sonneneinstrahlung im Sommer kann dazu führen, dass Sensoren gestört werden. Aufgrund der fehlenden Wahrnehmung des automatisierten

Systems wird der risikominimale Zustand ausgelöst. Der Fernfahrer steuert das Fahrzeug direkt, bis eine automatisierte Weiterfahrt möglich ist. Ein geplanter Anwendungsfall ist ein bekannter Tunnelabschnitt, in dem die Lokalisierung aufgrund der Abdunkelung nicht funktioniert. Der Teleoperator übernimmt die Fahrzeugführung bis zum Verlassen des Tunnels. Anschließend wird die automatisierte Funktion reaktiviert.

Die Teleoperation ist mit verschiedenen Herausforderungen und Anforderungen verbunden. Dazu gehört die Qualität des Video-Bildes, das verfügbare Gesamtsichtfeld, die Kameraperspektive, die räumliche Orientierung des Teleoperators, sowie die Tiefenwahrnehmung. Insbesondere die Kommunikation in Hinsicht der resultierenden Zeitverzögerung zwischen Fahrzeug und Leitstand hat einen großen Einfluss auf eine erfolgreiche Teleoperation. Darüber hinaus stellen die Fähigkeiten und Belastungen des Bedieners eine große Beeinflussung dar. In einer vorausgegangen Studienarbeit erfolgte bereits eine vertiefende Analyse der genannten Anforderungen.

2.3 Struktur von Szenen, Situationen und Szenarien

Für die Entwicklung von Fahrzeugen, die zu einer Teleoperation fähig sind, bedarf es der Festlegung von einheitlichen Schnittstellen. Dieser Bedarf resultiert aus der steigenden Komplexität derartiger Fahrzeuge. Die Szene definiert die Schnittstelle zwischen der Wahrnehmung und der Verhaltensplanung. Die Situation beschreibt die zentrale Schnittstelle innerhalb der Verhaltensplanung. Das Szenario dient zur funktionalen Beschreibung eines Systems (Ulbrich, et al., 2015 S. 1). Wie ist die genaue Definition dieser drei genannten Strukturen? In welcher Hinsicht unterscheiden sie sich? In den folgenden Unterpunkten sollen diese Fragen beantwortet werden. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit soll explizit auf die Ebenen der Szenario-Beschreibung eingegangen werden.

2.3.1 Begriffe: Szene, Situation und Szenario

Szene:

Eine Szene ist eine Momentaufnahme der Umgebung (ISO21448, 2022 S. 9). Sie wird in der Terminologie in einzelne Elemente eingeteilt. Sie ist abhängig von Parametern des Raumes und der Zeit. Die Szene findet innerhalb einer definierten Zeitspanne statt. Die Herausforderung besteht darin diese Zeitspanne genau zu identifizieren. Der Szenenraum enthält physische Objekte und Umgebungsmerkmale. Diesen Objekten werden spezifische Eigenschaften zugeordnet werden. Dazu zählen zum Beispiel dynamische Elemente, Akteure und

Beobachter. Es wird die Selbstrepräsentation und die Verknüpfung der einzelnen Entitäten betrachtet. Ein Akteur besitzt die Fähigkeit als eigenständiges Element selbst zu handeln. Ein Beobachter ist in der Lage die Szene von innen oder außen wahrzunehmen. Ein Akteur kann auch ein Beobachter sein. Ein dynamisches Element hat die Fähigkeit sich zu bewegen. Eine Szene kann die reale Welt nicht komplett wiedergeben. Sie ist somit subjektiv und damit auf die bekannten Informationen begrenzt. Innerhalb einer Simulation kann eine objektive Szene zur Verfügung gestellt werden (Ulbrich, et al., 2015 S. 2). Da die Simulation auf klar definierten Informationen basiert und somit begrenzt ist, bleibt sie eine Abstraktion der Realität.

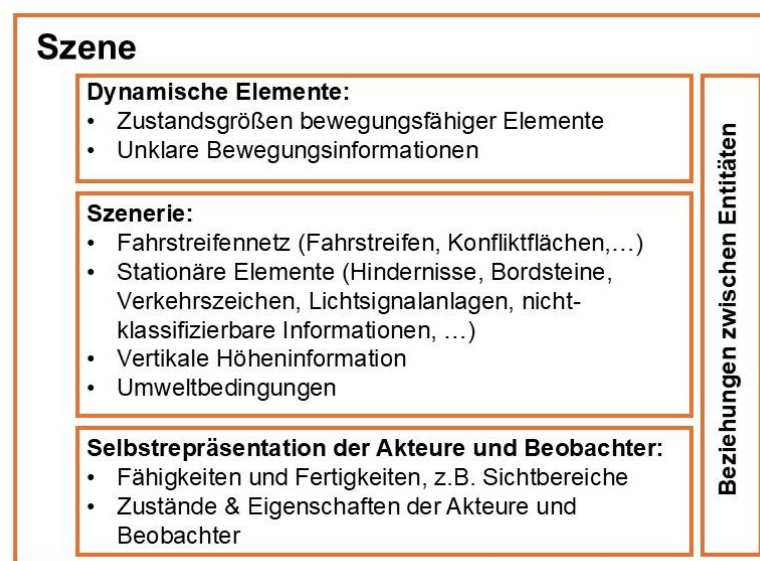


Abbildung 2 – Szene – eigene Darstellung in Anlehnung an (Ulbrich, et al., 2015 S. 3)

In Abbildung 2 wird der Aufbau einer Szene nach (Ulbrich, et al., 2015) dargestellt. Sie wird in vier Bestandteile eingeteilt. Dazu gehören die dynamischen Elemente, die Szenerie, die Selbstrepräsentation zwischen Akteuren, sowie Beobachtern und die Beziehungen zwischen den Entitäten. Es wird davon ausgegangen, dass die Bewegung dynamischer Objekte durch den Einfluss kinetischer Energie erfolgt. Alle handelnden Elemente sind Teil der dynamischen Elemente. Dynamische Elemente sind zum Beispiel Fahrzeuge, Fahrräder oder Fußgänger. Deren Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung beschreibt deren Zustand. Wechselnde Licht- und Sichtverhältnisse können zu nichtklassifizierbaren Informationen führen. Alle räumlich stationären Aspekte einer Szene werden zur Szenerie zugeordnet. In diesen Bestandteil werden topologische, semantische und metrische Informationen zugeordnet. Dazu gehören Fahrstreifen, Markierungen, Oberflächen und der Typ der

Verkehrsdomäne. Elemente, die zum Entwicklungszeitpunkt nicht klassifizierbar sind, müssen ebenso beachtet werden. Die Selbstrepräsentation definiert den inneren Zustand und das Eigenmodell eines Akteurs, oder Beobachters, innerhalb einer Szene. Die eigene Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung sind Beispiele für die Selbstrepräsentation. In diesem Bestandteil sind zudem die Fähigkeiten und Handlungsmöglichkeiten eines Akteurs inbegriffen. Die Beziehungen zwischen den Entitäten werden in Interaktionen, Abhängigkeiten und Konfliktpotentialen unterteilt. In der folgenden Abbildung sollen die Bestandteile einer Szene nach (Ulbrich, et al., 2015) anhand eines Beispiels verdeutlicht werden.

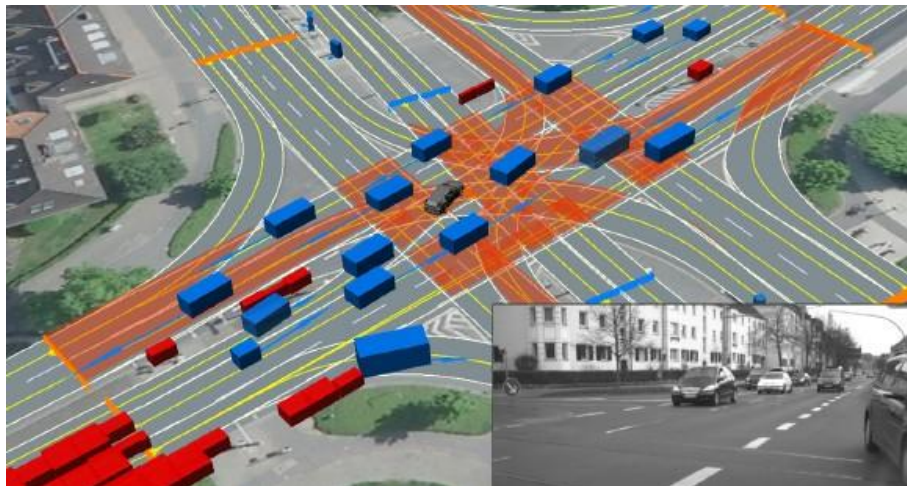


Abbildung 3 – Szene Illustration (Ulbrich, et al., 2015 S. 4)

In Abbildung 3 wird die Szene einer mehrspurigen Kreuzung illustriert. Es handelt sich demnach um einen komplexen Verkehrsknoten für automatisiertes Fahren. Der Hintergrund ist ein reales Satellitenbild. Die blauen Elemente sind dynamische Elemente und demnach Verkehrsteilnehmer, wie PKW, LKW oder Fahrräder. Blaue Pfeile geben Informationen über ihre Bewegungsrichtung. Die Längen der Pfeile könnten Informationen über ihre Geschwindigkeit geben. Die roten Darstellungen sind stationäre Elemente und somit ein Teil der Szenerie. Hierzu können Straßeninfrastruktur und Absperrungen eingeordnet werden. Die gelben Linien definieren Fahrspuren innerhalb der Szenerie. Die Selbstrepräsentation wird durch das schwarze Fahrzeug in der Mitte der Kreuzung dargestellt. Es werden Informationen über die eigene Position, Bewegungsrichtung und dem Fahrzeugzustand zur Verfügung gestellt. Die orangen Linien und Flächen dienen zur Verdeutlichung von Konfliktflächen. An den orangen Linien kann es zu kurzfristigen Stillständen dynamischer Elemente führen. Die orangen Flächen beschreiben Bereiche, wo Fahrbahnen gewechselt und überschritten werden. Es wird hiermit auf die Beziehungen zwischen den Entitäten eingegangen. Aus der Darstellung der Szene wird ersichtlich, dass die Größe der Kreuzung und die Anzahl

der relevanten Elemente nicht komplett ausschlaggebend ist. Die Anzahl an Wechselwirkungen, Unsicherheiten, möglichen Konflikten und Systemgrenzen ist entscheidend für die Beherrschbarkeit durch ein automatisiertes System. Die Komplexität erzeugt keine garantierte Teleoperationsrelevanz. Welche Faktoren diese Relevanz bestimmen, soll in dieser Arbeit untersucht werden.

Situation:

Eine Situation interpretiert und bewertet eine Szene in Hinsicht ihrer möglichen Entwicklung. Sie wird aus der Szene durch eine Auswahl an Informationen und Argumentationen abgeleitet. Diese Auswahl basiert auf Zielen und Werten. Situationen sind entscheidungs- und handlungsrelevant. Eine Situation wird aus der Sicht eines Elements generiert. Sie ist somit subjektiv und unvollständig in Hinsicht der Realität (Ulbrich, et al., 2015 S. 6).

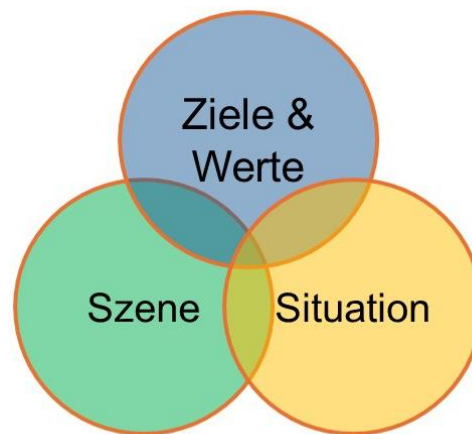


Abbildung 4 – Venn - Diagramm – eigene Darstellung in Anlehnung an (Ulbrich, et al., 2015 S. 7)

In Abbildung 4 ist das Venn Diagramm dargestellt. Es zeigt die Beziehung zwischen einer Szene, Zielen, sowie Werten und der Situation. Die Bestandteile überlappen sich teilweise. Die Überlappung zwischen Szene und Situation verdeutlicht die Auswahl relevanter Informationen und deren Repräsentationen in Hinblick auf die Aufgabenstellung. Die implizite und explizite Argumentation erfolgt durch Ziele und Werte. Der übrige Teil des orangefarbenen Bereichs, welcher keiner weiteren Überlappung zugehörig ist, verdeutlicht Informationen aus Situationsaspekten. Dazu werden situationsspezifische Interpretationen eingeordnet, die nicht direkt aus der Szene abgeleitet werden können (Ulbrich, et al., 2015 S. 7).

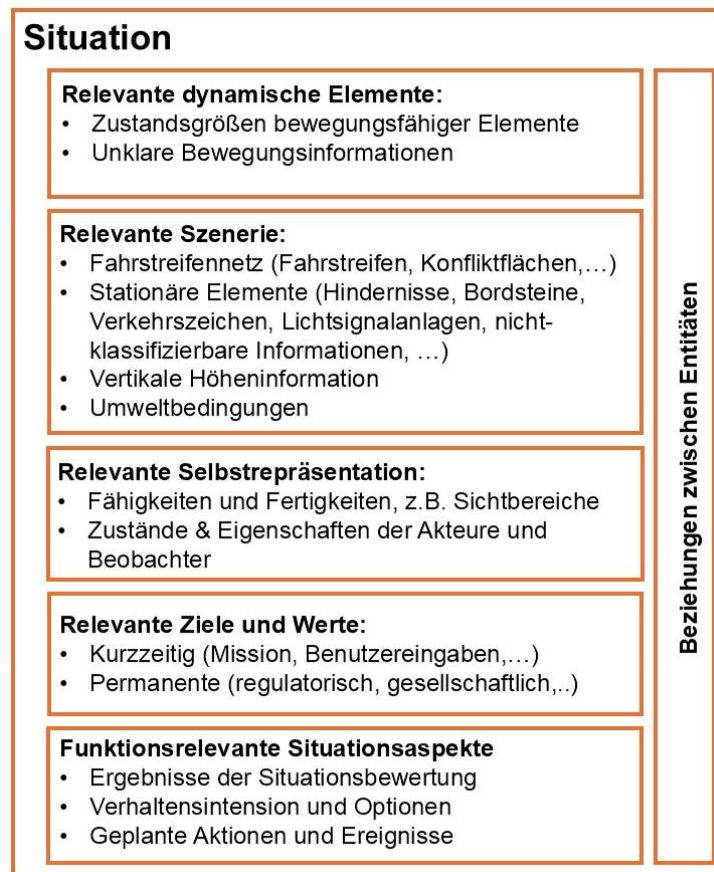


Abbildung 5 – Situation – eigene Darstellung in Anlehnung an (Ulbrich, et al., 2015 S. 8)

In Abbildung 5 werden die Bestandteile einer Situation dargestellt. Analog in Bezug auf die Szene sind Informationen zu dynamischen Elementen, der Szenerie, der Selbstrepräsentation und der Beziehungen zwischen den Entitäten vorhanden. Es werden im Unterschied zur Szene nur funktionsrelevante Informationen betrachtet. In Erweiterung der Szene werden Ziele und Werte einbezogen. Diese Ziele können kurzfristig oder permanent von Bedeutung sein. Kurzzeitig relevante Ziele sind zum Beispiel Fahrhinweise. Permanente Ziele und Werte sind zum Beispiel regulatorische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Des Weiteren werden funktionsrelevante Situationsaspekte betrachtet. Ändert sich die Fahrfunktion können andere Handlungen relevant sein. Innerhalb dieses Bestandteils werden anhand der Situationsbewertung resultierende Verhaltensintensionen, Optionen und Handlungen beschrieben.

Szenario:

Ein Szenario beschreibt eine Abfolge von Szenen. Es werden die Beziehungen von diesen Szenen betrachtet. Dabei werden die Ziele und Werte einer spezifizierten Situation einbezogen. Der Beginn eines Szenarios ist eine Anfangsszene. Das Szenario wird durch

Handlungen und Ereignisse beeinflusst. (ISO21448, 2022 S. 9). Die Szenen werden durch Aktionen und Ereignisse verknüpft.

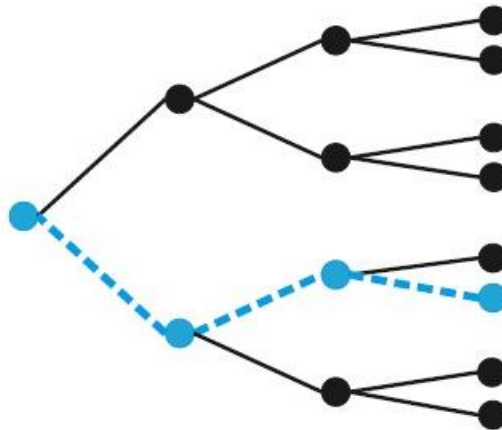


Abbildung 6 – Szenario Struktur (Ulbrich, et al., 2015 S. 10)

In Abbildung 6 ist die Struktur eines Szenarios abgebildet. Die Punkte beschreiben Szenen. Die Verbindungen zwischen den Punkten verdeutlichen die zeitliche Abfolge von Aktionen und Ereignissen. Ein Szenario wird durch mindestens eine Szene und daraus folgenden Aktionen sowie Ereignissen definiert. Dadurch kann ein Pfad nach Abbildung 6 eindeutig beschrieben werden. Ein Szenario kann auch durch eine definierte Anzahl aufeinander folgender Szenen spezifiziert werden. Aktionen und Ereignisse beschreiben den Raum zwischen den Szenen. Die Ausführung ist in der Realität mit Unsicherheiten verbunden. Ein Szenario ist somit nicht immer eindeutig definiert. Es wird zwischen stark festgelegten und offenen Szenarien unterschieden. In der ersten Ausführung wird fast alles eindeutig definiert. Dazu zählen zum Beispiel Fahrwege, Geschwindigkeiten, oder das Verhalten der Akteure. Im zweiten Fall wird das Szenario nur durch eine Startszene und den Zielen, sowie Werten der Akteure definiert (Ulbrich, et al., 2015 S. 10). Der blaue Pfad in Abbildung 6 verbindet vier Szenen miteinander und bildet damit ein Szenario.



Abbildung 7 – Szenarioaufbau – eigene Darstellung in Anlehnung an (Ulbrich, et al., 2015 S. 9)

In Abbildung 7 ist der Aufbau eines Szenarios dargestellt. Innerhalb des Szenarios ist die Szene untergeordnet. Die Szene ist somit ein Teil des Szenarios. Die Szene besteht aus den eingeführten drei Bestandteilen. Diese Bestandteile sind dynamische Elemente, die Szenerie und die Selbstrepräsentation der Entitäten. In Erweiterung der Szenenelemente werden im Szenario die Ziele und Werte der Akteure einbezogen. Im Unterschied zu der Situation wird der tatsächliche Verlauf von Aktionen und Ereignissen betrachtet. Das Szenario beschreibt damit die Ausführung und Entwicklung über die Zeit.

2.3.2 Ebenen der Szenario -Beschreibung

Nach den Autoren (Bagschik, et al., 2017 S. 7) werden Szenarien in drei Abstraktionsebenen eingeteilt. Dazu gehören funktionale, logische und konkrete Szenarien.

Funktionale Szenarien

Funktionale Szenarien bilden die semantische Ebene der Darstellung von Betriebsszenarien. Funktionale Szenarien weisen die höchste Abstraktionsebene auf. In einer sprachlichen Beschreibung werden die Entitäten und die Beziehungen zwischen den Entitäten dargestellt. Funktionale Szenarien sind widerspruchsfrei. Der Detailgrad des Vokabulars kann unterschiedlich sein. Die aktuelle Entwicklungsphase und der Fokus auf die Betrachtung

sind entscheidend. Das funktionale Szenario wird zudem auf den Anwendungsfall und die Anwendungsdomäne spezifiziert (Bagschik, et al., 2017 S. 7).

Funktionale Szenarien:	<u>Basisstrecke:</u> 3- streifige Autobahn in Kurve Begrenzung 100km/h Verkehrszeichen rechts und links	<u>Stationäre Objekte:</u> -	<u>Dynamische Objekte:</u> Ego, Stau; Interaktion: Ego in Manöver „Annähern“ auf mittleren Fahrstreifen, Stau zähfließend	<u>Umwelt:</u> Sommer, Regen
-------------------------------	--	---------------------------------	--	------------------------------------

**Abbildung 8 – Funktionales Szenario – eigene Darstellung
in Anlehnung an (Bagschik, et al., 2017 S. 8)**

In Abbildung 8 ist die Beschreibung eines funktionalen Szenarios nach den Autoren (Bagschik, et al., 2017) abgebildet. Das Szenario wird in einer Tabelle definiert. Es werden Informationen zu der Basisstrecke, stationären Objekten, dynamischen Objekten und der Umwelt eingeordnet. Die Informationen zur Basisstrecke definieren die Anzahl der Fahrstreifen und nennen Geschwindigkeitsbegrenzungen. Das Fahrzeug befindet sich auf einer dreispurigen Autobahn. Ein Verkehrszeichen auf der rechten und linken Seite begrenzt die Geschwindigkeit auf 100 km/h. Es werden keine Stationären Objekte erfasst. Dynamische Objekte sind das Ego-Fahrzeug und andere Fahrzeuge. Zudem werden Interaktionen, wie Fahrmanöver zwischen den dynamischen Elementen, definiert. Es befinden sich andere Verkehrsteilnehmer in der Nähe des Ego-Fahrzeugs. Der Verkehr staut sich. Das Ego Fahrzeug nähert sich auf dem mittleren Fahrstreifen an. Das letzte Element ordnet Informationen über die Umweltbedingungen ein. Es ist Sommer und es regnet. In diesem Szenario werden die Entitäten und die Beziehungen sachlich beschrieben. Parameter werden nur sprachlich beschrieben. Es werden keine Parameterbereiche oder spezifischen Werte zur Verfügung gestellt.

Logische Szenarien

Logische Szenarien bilden eine Detaillierung funktionaler Szenarien im physikalischen Zustandsraum ab. Es werden Parameterbereiche zur Beschreibung von Entitäten definiert. Es wird zwischen absoluten und relativen Parametern unterschieden. Absolute Parameter beschreiben die Eigenschaften der Entitäten. Relative Parameter beschreiben die Beziehungen zwischen den Entitäten. Logische Szenarien werden formal beschrieben. Statistische Verteilungen können Parameterbereiche spezifizieren. Numerische Bedingungen und

Korrelationsfunktionen können die Beziehungen zwischen den Entitäten spezifizieren (Bagschik, et al., 2017 S. 8-9).

Logische Szenarien:	<u>Basisstrecke:</u> Breite Fahrstreifen: [2,3...3,5] m Kurvenradius: [0,6...0,9] km Pos_Verkehrszeichen: [0...200] m	<u>Stationäre Objekte:</u> -	<u>Dynamische Objekte:</u> Stauende_Pos.: [10...200] m Stau_Geschw.: [0...30] km/h Ego_Abstand.: [50...300] m Ego_Geschw.: [80...130] km/h	<u>Umwelt:</u> Temperatur: [10...40] °C Tröpfchengröße: [20...100] µm
----------------------------	---	---------------------------------	--	---

Abbildung 9 – Logisches Szenario – eigene Darstellung in Anlehnung an (Bagschik, et al., 2017 S. 8)

In Abbildung 9 ist ein logisches Szenario nach den Autoren (Bagschik, et al., 2017) dargestellt. Informationen zur Basisstrecke, stationären Objekten, dynamischen Objekten und Umweltbedingungen detaillieren das Szenario. Die Informationen der Basisstrecke sind Wertebereiche zu Längen und Positionen. Die Fahrbahnbreite liegt zwischen 2,3 und 3,5 Metern. Der Kurvenradius liegt zwischen 0,6 und 0,9 Kilometern. Die Verkehrszeichen sind bis zu 200 Meter entfernt. Es werden keine stationären Objekte erfasst. Dynamische Objekte sind das Ego-Fahrzeug und andere Fahrzeuge in der Nähe. Es werden Informationen zu Geschwindigkeiten und Abständen gegeben. Das Stauende ist zwischen 10 und 200 Meter entfernt. Die Fahrzeuge fahren mit einer Geschwindigkeit bis zu 30 Kilometer pro Stunde. Das Ego-Fahrzeug ist zwischen 50 und 300 Meter entfernt. Die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs liegt zwischen 80 und 130 Kilometer pro Stunde. Die Temperatur liegt zwischen 10 und 40 Grad Celsius. Die Tröpfchengröße des Regens liegt zwischen 20 und 100 Mikrometer. In diesem Szenario werden die Entitäten und ihre Beziehungen detailliert beschrieben. Dafür werden klare Parameterbereiche gegeben. Genaue Parameter sind nicht gegeben.

Konkrete Szenarien

Konkrete Szenarien bilden eine Detaillierung logischer Szenarien. Die Parameterbereiche werden zu eindeutigen Parametern im Zustandsraum konkretisiert. Die Entitäten und die Beziehungen zwischen den Entitäten werden somit eindeutig dargestellt. Eine infinitesimale Abtastung und Kombination der Wertebereiche ermöglichen eine Ableitung beliebig vieler konkreter Szenarien aus einem logischen Szenario (Bagschik, et al., 2017 S. 9).

Konkrete Szenarien:	<u>Basisstrecke:</u> Breite Fahrstreifen: 3,2 m Kurvenradius: 0,7 km Pos_Verkehrszeichen: 150 m	<u>Stationäre Objekte:</u> -	<u>Dynamische Objekte:</u> Stauende_Pos.: 40 m Stau_Geschw.: 30 km/h Ego_Abstand.: 200 m Ego_Geschw.: 100 km/h	<u>Umwelt:</u> Temperatur: 20°C Tröpfchengröße: 30µm
----------------------------	---	---------------------------------	--	--

Abbildung 10 – Konkretes Szenario – eigene Darstellung in Anlehnung an (Bagschik, et al., 2017 S. 8)

In Abbildung 10 wird ein konkretes Szenario nach den Autoren (Bagschik, et al., 2017) etabliert. Das Szenario wird in Tabellenform definiert. Es werden je Informationen über die Basisstrecke, stationäre Objekte, dynamische Objekte und die Umwelt gegeben. Innerhalb der Basisstrecke werden Positions- und Längenwerte konkretisiert. Der Fahrstreifen hat eine Breite von 3,2 Metern. Die Kurve hat einen Radius von 0,7 Kilometern. Das nächste Verkehrszeichen ist 150 Meter entfernt. Es werden keine stationären Objekte beschrieben. Dynamische Objekte beschränken sich in diesem Szenario auf das EGO- Fahrzeug und vorausfahrende Fahrzeuge. Die Informationen in diesem Element definieren konkrete Werte über Geschwindigkeiten und Abstände. Die Autos stauen sich auf einer Länge von 40 Metern. Die anderen Verkehrsteilnehmer haben eine Geschwindigkeit von 30 Kilometern pro Stunde. Das Ego- Fahrzeug ist 200 Meter entfernt und hat eine Geschwindigkeit von 100 Kilometern pro Stunde. Das letzte Element beschreibt Informationen über Umweltbedingungen. Die Temperatur beträgt 20°C. Die Tröpfchengröße des Regens beträgt 30 Mikrometer. In diesem Szenario werden die Entitäten und ihre Beziehungen eindeutig beschrieben. Zu den Entitäten gehören das EGO-Fahrzeug und vorausfahrende Fahrzeuge, die sich in einem Stau sammeln. Es werden konkrete Parameterwerte und ihre physikalischen Einheiten genannt.

2.4 Systemgrenzen automatisierter Verkehrssysteme

Systemgrenzen beschreiben den sicheren Funktionsbereich eines automatisierten Systems. Verkehrsszenarien sind eine Möglichkeit funktionale Systemgrenzen zu identifizieren. Das spezifische Verhalten und der Umgang mit Fehlzuständen haben Einfluss auf die Sicherheit automatisierter Systeme (Wittman, et al., 2015 S. 1). Um den menschlichen Fahrer komplett von seiner Fahr- und Überwachungsaufgabe abzulösen, müssen die Systemgrenzen eigenständig durch das Fahrzeug erkannt werden. Es ist eine Strategie mit drei Schritten notwendig. Zuerst müssen alle relevanten Systemgrenzen identifiziert werden. Im

zweiten Schritt muss eine einheitliche und nachvollziehbare, wie auch reproduzierbare Definition generiert werden. Zuletzt müssen die Systemgrenzen erkannt werden. Es muss angemessen reagiert werden. Eine grundsätzliche Vermeidung dieser Grenzen soll ebenso Teil der Strategie sein (Wittman, et al., 2015 S. 1). Um Systemgrenzen zu identifizieren, ist ein Spezifikationsraum notwendig. In diesem Raum befinden sich alle denkbaren Szenarien. Es soll zudem die Ableitung kritischer Szenarien ermöglicht werden. Es resultiert die Notwendigkeit alle relevanten Aspekte im Spezifikationsraum eindeutig beschreiben zu können. Es werden fünf Teilräume definiert. Dazu gehören die statische Umgebung, die Verkehrsdynamik, Umgebungsbedingungen, der Zustand des Ego-Fahrzeuges und Passagieraktionen. Eine Beherrschbare Komplexität wird gewährleistet, in dem Systemgrenzen durch eine klare Definition von Grenzfallszenarien abgeleitet werden (Wittman, et al., 2015 S. 3).

Die Statische Umgebung wird durch einen Top-down-Ansatz definiert. Die globale Landmasse wird durch die Auswahl eines Landes eingegrenzt. Anschließend wird der Domänenbereich festgelegt. Es wird zwischen Infrastrukturtypen, wie die Autobahn, ländliche oder städtische Gebiete und freiem Gelände eingeteilt. Letzteres gilt für autonome Verkehrssystem nicht als relevant. Die Art der Knotenpunkte und die Eigenschaften der Straße beschreiben die folgenden Kategorien. Das Straßenprofil, die statischen Bedingungen und der dreidimensionale Verlauf definieren die Eigenschaften der Straße. Es besteht eine direkte Verknüpfung mit den Straßenverkehrsregeln. Es werden ebenso Sonderfälle wie Brücken, Tunnel und Baustellen betrachtet (Wittman, et al., 2015 S. 3). Diese genannten Eigenschaften haben einen Einfluss auf die Wahrnehmung und der daraus folgenden Lösung der Fahraufgabe durch das automatisierte System. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf Sonderfällen wie Bauställen und Tunnel. Es können funktionale Systemgrenzen resultieren. Zudem kann die Beherrschbarkeit der Situation eingeschränkt werden.

Die Verkehrsdynamik beschreibt die Verkehrsteilnehmer und deren Verhalten. Die Zusammensetzung der Verkehrsdynamik ergibt sich aus dem Verhalten des Ego-Fahrzeuges und aller anderen relevanten dynamischen Objekten. Die Verhaltensweisen werden mit Hilfe von Manövern definiert. Die Beschreibung von Randszenarien erfolgt durch Detaillierungswerte. Dazu gehören zum Beispiel Verzögerungs- und Distanzwerte. Die Anzahl der Teilnehmer, deren Wechselwirkungen untereinander und die Abhängigkeit von der Infrastruktur erzeugen eine hohe Komplexität. Die Bewältigung dieser Komplexität stellt eine große Herausforderung für automatisierte Verkehrssysteme dar.

Die Umweltbedingungen werden in die Kategorien Reibung, Sichtverhältnisse, Temperatur, Wind und die Bedeckung der statischen Umgebung eingeteilt. Umgebungsbedingungen haben einen großen Einfluss auf die Bewältigung des spezifischen Szenarios. Ein geringer Reibwert durch eine nasse oder glatte Fahrbahn kann die Fahrdynamik beeinflussen. Starke Seitenwinde können ein unvorhersehbares Fahrverhalten auslösen. Erhöhte Lichtverhältnisse durch eine starke Sonneneinstrahlung im Sommer können Sensorwerte beeinflussen. Analog dazu können niedrige Lichtverhältnisse bei Nacht eine unzureichende Wahrnehmung der Umgebung zur Folge haben. Eine erhöhte und eine zu niedrige Temperatur kann die Funktionalität der Elektronik beeinflussen. Eine Bedeckung der Fahrbahnmarkierungen durch Schnee oder Schmutz kann ebenso zu funktionalen Grenzen führen.

Die letzten Kategorien sollten den äußeren Zustand des Systems beschreiben. Das Ego-Fahrzeug beschreibt den inneren Zustand. Die darin befindlichen Insassen werden ebenso betrachtet, gelten jedoch nicht als Bestandteil des Systems. Es werden lediglich die Sensorik, die Logik und die Aktuatorschnittstellen einbezogen. Daraus resultiert eine Reduzierung der Komplexität des automatisierten Systems. Die klare Definierung eines Betrachtungsraumes ist notwendig für die Entstehung von Systemgrenzen. Eine Reduzierung dieser Art macht deutlich, welche Einflussgrößen relevant sind, welche Zustände betrachtet werden und welche Systemebenen analysiert werden.

2.5 Operational Design Domain (ODD)

Der Operational Design Domain definiert Betriebsbedingungen, nach denen ein automatisiertes System ausgelegt ist. Spezifische Einschränkungen sind mit dem ODD verbunden. Dazu gehören Aspekte in Hinsicht der Umwelt, Geografie, Tageszeit und Verkehrs- oder Straßenmerkmalen. Betriebsbedingungen können zeitlichen Veränderungen unterliegen (SAE_International, 2021 S. 17). Sie sind somit nicht durchgehend konstant. Aus dem Betriebsbereich einer automatisierten Funktion wird der Auslegungsbereich spezifiziert. Es werden nach der SAEJ3016 Einschränkungen der SAE-Stufen 1,2,3 und 4 erfasst. Die Stufe 5 des Automatisierungsgrades nach SAE verfügt über einen unbegrenzten Betriebsbereich. Die Einschränkungen werden eingeteilt in die Straßenumgebung, das Verhalten der automatisierten Fahrfunktion und dem Zustand des Fahrzeuges. Zu den Einschränkungen der Straßenumgebung gehören Einteilungen in Straßenarten, temporäre Einrichtungen, spezifische Elemente, das Verkehrsaufkommen und Wetter- sowie Sichtverhältnisse. Temporäre Elemente beschreiben zum Beispiel Baustellen. Spezifische Elemente werden unterteilt in

Kreisverkehre oder Tunnel. Einschränkungen, die sich auf das Verhalten der automatisierten Fahrfunktion spezifisch beschränken sind zum Beispiel Geschwindigkeitsbegrenzungen und Manöverlimitationen. Es wird ebenso der Zustand des Fahrzeuges betrachtet. In diese Kategorie gehört zum Beispiel der Reifendruck und Beschränkungen zur Gesamtmasse. Es ist eine große Herausforderung den Betriebsbereich eines automatisierten Systems zu identifizieren. Die SAE J3016 nennt spezifische Beispiele für einen Operational Design Domain. Im Beispiel benötigt ein Fahrzeug der SAE-Stufe 3 in seinem Betriebsbereich deutlich erkennbare Fahrbahnmarkierungen. In kurzen Abschnitten fehlender und verblasster Markierung kann das automatisierte System durch das Folgen vorausfahrender Fahrzeuge die Fahraufgabe weiterführen. Die Sensorfusion unterstützt hierbei durch das Zusammenführen der Informationen unterschiedlicher Sensoren zu einem zuverlässigen Umweltmodell (SAE_International, 2021 S. 17-18). Es entsteht der Bedarf für die Konzeption und Anwendung einer ODD-Taxonomie (Czarnecki, 2018 S. 1). Die große Anzahl möglicher Betriebsbedingungen und deren Wechselwirkungen zueinander erschweren die Definition eines eindeutigen Einsatzbereichs. Eine systematische Strukturierung der Randbedingungen stellt die notwendige Unterstützung für die Beschreibung des Betriebsbereichs dar. Eine Überschreitung dieser Randbedingungen führt gegebenenfalls zu einer desfunktionalen Ausführung der Fahraufgabe durch das automatisierte System. Der Betriebsbereich dient somit als Grundlage für die Identifikation von Systemgrenzen. Fahrzeuge, die zur SAE- Stufe 4 zugeordnet werden, können bei Verlassen des Betriebsbereichs eigenständig in einen risikominimalen Zustand übergehen. Dieser Zustand beschreibt das verkehrsgerechte Abstellen des Fahrzeuges. In diesem Fall könnte das Problem durch den Eingriff eines Operators aus der Ferne gelöst werden. Dieser Operator würde die notwendigen Entscheidungen treffen, um die Ausführung der Fahraufgabe zu unterstützen. Die zweite Möglichkeit wäre das Fahrzeug direkt aus der Ferne zu steuern. Der zweite Fall würde die direkte Teleoperation beschreiben.

3 Stand der Forschung

3.1 Szenarien -basierte Entwicklung

Welche Möglichkeiten gibt es automatisierte Verkehrssysteme abzusichern? Reale Testfahrten sind seit Beginn der Entwicklung ausschlaggebend. Dabei wird das Fahrverhalten beobachtet und ein statistischer Vergleich mit der menschlichen Fahrleistung erstellt. Technologieunternehmen wie Waymo und Tesla testen ihre Fahrzeuge auf hunderttausenden Kilometern. Wie viele Kilometer sind für eine ausreichende Absicherung, Erprobung und Validierung automatisierter Systeme notwendig? Die Autoren Nidhi Kalra und Susan M. Paddock haben sich in einer Studie mit dieser Frage beschäftigt und konkrete Werte ausgerechnet. Es sollen zwei Fragen beantwortet werden. Wie viele fehlerfreie Testmeilen sind notwendig, um eine vorgegebene Fehlerrate automatisierter Fahrzeuge statistisch nachzuweisen? Um eine Fehlerrate von 1,09 Todesfällen auf 100 Millionen Meilen, mit einem Konfidenzniveau von 95%, zu demonstrieren, muss das autonome System 275 Millionen fehlerfreie Meilen zurücklegen (Kalra, et al., 2016 S. 184). Das entspricht einer Distanz von ungefähr 443 Millionen Kilometern. Das Konfidenzniveau definiert, dass die Todesfallrate zu 95% unter dem gegebenen Grenzwert liegt. Wie viele Meilen müssten zurückgelegt werden, um nachzuweisen, dass die Ausfallrate automatisierter Systeme niedriger ist als die menschliche Ausfallrate? Um nachzuweisen, dass die Ausfallrate 20% niedriger ist, muss das automatisierte System über 11 Milliarden Meilen zurücklegen. Das entspricht einem Wert von über 18 Milliarden Kilometern. Mit einer Flotte von 100 autonomen Fahrzeugen, die 24 Stunden am Tag und 365 Tage im Jahr mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von rund 40 Kilometern pro Stunde fahren, würde die Testphase ungefähr 518 Jahre dauern (Kalra, et al., 2016 S. 189). Eine vollständige Absicherung automatisierter Systeme ausschließlich durch reale Fahrversuche ist somit nicht möglich. Kritische Ereignisse treten zudem sehr selten auf und können somit nur sehr schwer real untersucht werden.

Ein technisches System auf Grundlage von Szenarien zu testen, zu verifizieren und zu validieren, ist der Ansatz, welcher in dieser Arbeit erforscht werden soll. Dieser Ansatz ist systematisch und strukturiert (PEGASUS, 2019). Für die Entwicklung von Hardware- und Softwarekomponenten müssen die notwendigen Anforderungen abgeleitet werden. Für die Definierung dieser Anforderung werden relevante Szenarien benötigt. Diese Szenarien werden bereits in der Konzeptphase identifiziert und in der weiteren Entwicklungsphase konkretisiert. In Simulationsumgebungen werden die Szenarien anschließend ausgeführt. Durch

diesen Prozess kann das Systemverhalten untersucht werden. Dieser Ansatz ist reproduzierbar und kostengünstig. Anschließend werden ausgewählte Szenarien auf Prüfständen, Testgeländen und dem realen Verkehr geprüft. In der Validierung wird bewertet, ob das System die Anforderungen in Hinsicht des Szenarios erfüllt (Menzel, et al., 2018 S. 1). Das System wird freigegeben, wenn eine ausreichend große Menge an Szenarien überprüft wurde und die Einsatzfähigkeit nachgewiesen wurde. Die Komplexität des Straßenverkehrs in Abhängigkeit von den Entitäten und deren Beziehungen zueinander untermauern den Bedarf einer ausreichenden Struktur. Die Anzahl möglicher Szenarien ist ohne eine definierte Methodik unendlich. Im ersten Schritt müssen demzufolge Strukturen gefunden werden, die Szenarien in einem definierten Raum eingrenzen.

Eine erste Einordnung von Szenarien erfolgt in sehr große Bereiche. Dazu zählen unbekannte, bekannte und gefährliche Szenarien. In der ISO 21448 wird ein Schema erklärt, welches diese Bereiche miteinander in Verbindung setzt. Die Größe der Bereiche gibt Aufschluss über die Anzahl der Szenarien in diesem Bereich. Ein sehr großer Bereich deutet auf einer sehr großen Anzahl von Szenarien hin. Ein sehr kleiner Bereich deutet auf eine sehr kleine Anzahl hin.

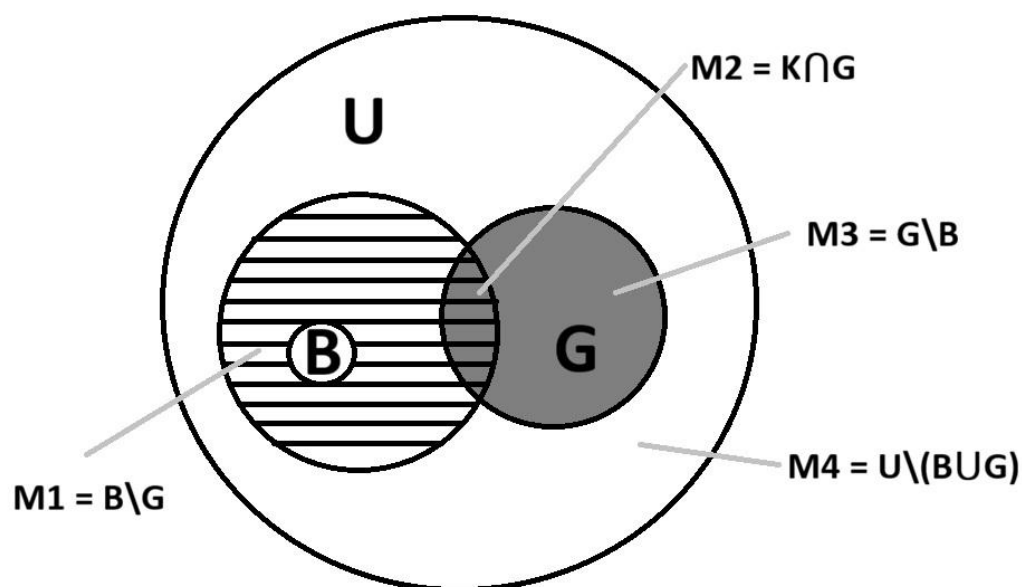


Abbildung 11 – Mengeneinteilung – eigene Darstellung in Anlehnung an (ISO21448, 2022 S. 14)

In Abbildung 11 werden Szenarien in die genannten drei Bereiche eingeteilt. Der Bereich U beschreibt die Anzahl aller unbekannten Szenarien. Der Bereich B beschreibt den Bereich

der bekannten Szenarien und der Bereich G den Bereich der gefährlichen Szenarien. Hierbei sind Szenarien gemeint, die ein automatisiertes Verkehrssystem nicht sicher und eigenständig lösen kann. Die Bereiche B und G überschneiden sich. Sie befinden sich innerhalb des Bereichs U. Daraus lassen sich vier mögliche Mengen differenzieren. Die erste Menge M1 beschreibt den Bereich B ohne die Überschneidung zu G. Es handelt sich somit um bekannte und ungefährliche Szenarien. Die zweite Menge M2 definiert die Überschneidung des Bereiches B und G. Hierzu werden alle Szenarien zugeordnet, die bekannt und gefährlich sind. Innerhalb der Menge M3 sind alle Szenarien des Bereichs G ohne die Überschneidung zu B enthalten. Es werden damit alle Szenarien definiert, die unbekannt oder gefährlich sind. Die Menge M4 beschreibt den Bereich U ohne die Bereiche B und G. In dieser Menge sind alle Szenarien inbegriffen, die unbekannt und ungefährlich sind. Aus Abbildung 11 wird deutlich, dass der Bereich gefährlicher bekannter und gefährlicher unbekannter Szenarien sehr groß ist. Des Weiteren kann abgeleitet werden, dass nicht alle Szenarien relevant sein müssen. Der Mehrwert entsteht durch eine klare Abgrenzung des Szenarienraums.

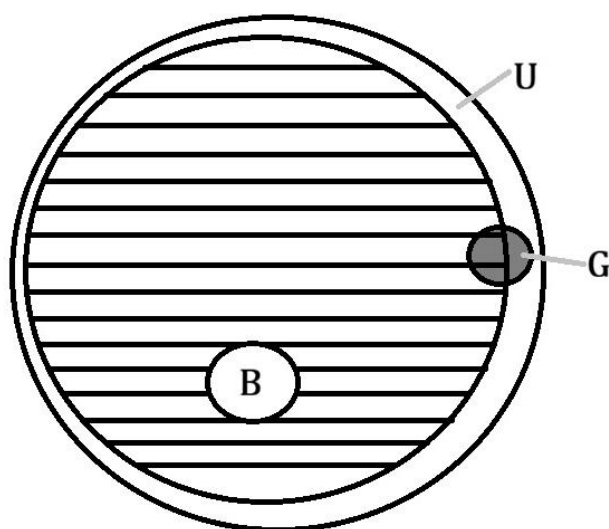


Abbildung 12 – Mengenoptimierung – eigene Darstellung in Anlehnung an (ISO21448, 2022 S. 15)

In Abbildung 12 ist eine Optimierung des Mengenzustandes nach Abbildung 11 dargestellt. Die Menge der gefährlichen, bekannten und unbekannten Szenarien ist so weit wie möglich minimiert. Die Menge der bekannten, ungefährlichen Szenarien ist weitestgehend maximiert. Der Bereich der unbekannten Szenarien wird ebenso minimiert. Dieser Zustand ist im

heuten Stand des autonomen Fahrens nicht möglich. Die Teleoperation soll eine Rückfallebene bieten, um autonome Systeme zu unterstützen. Damit könnte der Bereich der gefährlichen bekannten und unbekannten Szenarien minimiert werden. Mit den Abbildungen 11 und 12 wird eine erste Strukturierung vorgestellt. Die vielfältige Anzahl an Parametern innerhalb dieser Szenarien macht eine vollständige Untersuchung aller Kombinationen unmöglich. Insbesondere die Untersuchung sicherheitskritischer Ereignisse ist aufgrund ihrer Seltenheit mit erheblichem Aufwand verbunden. Da diese Vollständigkeit des Betrachtungsraums nicht realisiert werden kann müssen die Untersuchungen auf relevante Szenarien beschränkt werden. In dieser Hinsicht sollen im nächsten Schritt Methoden zur systematischen Generierung relevanter Szenarien gefunden werden.

3.2 Methoden der Szenario Generierung

Die Grundlagen der Szenariobeschreibung wurden im zweiten Kapitel anhand von (Ulbrich, et al., 2015) erläutert. Zur systematischen Generierung von Szenarien existieren verschiedene Ansätze. Aufgrund des Umfangs und der weiten Verbreitung im Bereich der Absicherung automatisierter Systeme wird die vorliegende Arbeit insbesondere die PEGASUS-Methode und die Systemtheoretische Prozessanalyse (STPA) als Stand der Forschung betrachten und untersuchen. Im Folgenden Kapitel werden zuerst die Verfahren innerhalb der PEGASUS Methode analysiert.

Die PEGASUS Methode wurde im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Forschung geförderten Projekts entwickelt. Ziel des Projektes ist die Etablierung allgemein anerkannter Qualitätskriterien, Werkzeuge und Methoden, sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen. Die Methodik soll bestehende Ansätze zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen, die überwiegend auf sehr hohen Testfahrleistungen basieren, durch einen szenariobasierten Ansatz erweitern. Das Vorgehen folgt einer systematischen und strukturierten Methodik. (PEGASUS, 2019 S. 4).

Im Rahmen des Projektes werden hochautomatisierte Fahrfunktionen ab SAE-Stufe 3 mithilfe neuer Methoden zur Verifikation und Validierung untersucht. Die Betrachtung erfolgt auf Systemebene. Es werden keine einzelnen Komponenten analysiert. Stattdessen beschreiben Eingangs- und Ausgangsgrößen das Verhalten des Gesamtsystems. Das Testobjekt wird dabei als Black-Box betrachtet. Eine Black-Box beschreibt das äußere Verhalten eines Systems, ohne dessen innere Funktion zu berücksichtigen. Die Analyse erfolgt ausschließlich anhand von Eingängen, Ausgängen und beobachtbaren Reaktionen.

Das Projekt besteht aus vier Teilprojekten mit hoher gegenseitiger Abhängigkeit. Durch einen iterativen Entwicklungsprozess entstand aus den einzelnen Teilprojekten die PEGASUS-Methode. Die dabei gewonnen Erkenntnisse werden fortlaufend zur Verbesserung genutzt. Die resultierende Methodik umfasst insgesamt 21 Elemente sowie deren Beziehungen zueinander (PEGASUS, 2019 S. 10).

Im weiteren Verlauf des Kapitels werden diejenigen Elemente der PEGASUS Methode betrachtet, die für die Generierung von Szenarien relevant sind. Die Schritte zur Szenariogenerierung, Szenarioreduktion und Szenariobewertung bauen innerhalb der Methode nicht strikt aufeinander auf. Sie verlaufen zum Teil parallel und weisen gegenseitige Abhängigkeiten auf. Daher werden einzelne Schritte zunächst ausgelassen und in den entsprechenden Abschnitten zur Szenarioreduktion beziehungsweise Szenariobewertung behandelt.

Schritt 0 der PEGASUS-Methode umfasst die Beschreibung des Testobjekts. Hierzu wird der Funktionsumfang betrachtet. Es werden die Systemfähigkeiten und Einschränkungen der automatisierten Fahrfunktion definiert. Zu den Fähigkeiten können beispielsweise die automatisierte Verfolgung eines vorausfahrenden Fahrzeugs, oder die Durchführung spezifischer Fahrmanöver innerhalb eines Geschwindigkeitsbereichs sein. Einschränkungen beschreiben hingegen Fahraufgaben, oder Randbedingungen, die durch das automatisierte System nicht bewältigt werden können. Beispiele hierfür sind Autobahnauffahrten und Autobahnabfahrten. Die Beschreibung des Testobjekts bildet die Grundlage für die Identifikation relevanter Szenarien. Mit dieser Betrachtung wird der Szenarienraum eingegrenzt. Auf dieser Basis werden erste funktionale Szenarien abgeleitet (PEGASUS-0, 2019 S. 1). Es werden relevante Verkehrssituationen ausgewählt und auf abstrakter Ebene beschrieben. Zur strukturierten Beschreibung werden die relevanten Einflussgrößen in einem mehrschichtigen Modell eingeordnet. Zu diesen Elementen gehört die Geometrie der Straße, die Infrastruktur der Straßenverkehrsordnung, temporäre Vorschriften, dynamische Objekte, dynamische Fahrmanöver und das Wetter (PEGASUS-0, 2019 S. 2).

Die Wissensquellen der PEGASUS-Methodik werden im Schritt 1 beschrieben. Hierzu zählen Fachwissen, Standards, Normen sowie gesetzliche Vorschriften. Relevante Dokumente sind zum Beispiel international anerkannte Normen wie die SAE J3061 und die ISO26262. Darüber hinaus sind nationale gesetzliche Vorgaben sowie internationale Regelwerke und Konventionen zu berücksichtigen. Neben verbindlichen Vorschriften werden auch Empfehlungen und Leitlinien als Wissensquellen berücksichtigt. Ein bekanntes Beispiel stellt der Maßnahmenplan der Deutschen Bundesregierung zum automatisierten und vernetzten

Fahren dar. Dieser Plan basiert auf den Empfehlungen der Ethik-Kommission automatisiertes und vernetztes Fahren. Er definiert grundlegende Anforderungen, sowie ethische Rahmenbedingungen für die Entwicklung und den Einsatz automatisierter Fahrfunktionen (PEGASUS-1, 2019 S. 1-2). Die in Schritt 1 betrachteten Wissensquellen dienen als Grundlage für die Ableitung von Anforderungen, Randbedingungen und sicherheitsrelevanten Aspekten. Sie bilden eine wesentliche Basis für die Identifikation, Bewertung und Absicherung von Szenarien.

Schritt 2 beschreibt die datenbasierte Ableitung von Szenarien. Die verwendeten Daten sollen verfügbar und möglichst nicht vertraulich sein. Hierzu werden Daten aus verschiedenen Quellen gesammelt und analysiert. Untersuchungen des natürlichen Realverkehrs (NDS) erfassen das unbeeinflusste Verhalten von Verkehrsteilnehmern unter realen Bedingungen. Feldversuche (FOT) dienen der gezielten Untersuchung des Verhaltens eines Systems im praktischen Betrieb. Simulationen ermöglichen die Untersuchung eines digitalen Modells des Systems und liefern Erkenntnisse über mögliche Fahrzeugreaktionen. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist dabei auf die zugrunde liegenden Modelle und Eingangsdaten beschränkt. Unfalldatenbanken, wie GIDAS, liefern Informationen über besonders kritische Verkehrssituationen, komplexe Fahraufgaben und potenzielle Systemgrenzen. Ergänzend werden Daten realer Testfahrten genutzt, um das Systemverhalten unter realen Einsatzbedingungen zu untersuchen. Dadurch können kritische Situationen, Ursachen von Systemausfällen, sowie potenzielle Unterstützungsbedarfe identifiziert werden (PEGASUS-2, 2019 S. 1-2). Die gewonnenen Daten dienen als Grundlage zur Identifikation und Beschreibung relevanter Szenarien. Es können hierbei wiederkehrende Situationen, kritische Ereignisse, sowie charakteristische Verhaltensmuster erkannt und für die weitere Szenarioentwicklung genutzt werden.

Schritt 4 beschreibt die systematische Identifikation von Szenarien. Hierbei werden wissensbasierte Ansätze eingesetzt, um die datenbasierten Szenariogenerierung zu ergänzen. Das Ziel ist die gegenseitige Unterstützung der Ansätze sowie der Ausgleich ihrer jeweiligen Nachteile. Im Rahmen der PEGASUS-Methode werden drei Ansätze zur Szenarioidentifikation vorgestellt. Der erste Ansatz basiert auf Ontologien. Eine Ontologie stellt ein formales Wissensmodell dar, in dem relevante Entitäten und deren Beziehungen zueinander beschrieben werden. Dadurch wird eine strukturierte und nachvollziehbare Beschreibung von Verkehrssituationen ermöglicht. Die Strukturierung erfolgt mit Hilfe eines 6-Schichten-Modells, das unterschiedliche Einflussgrößen einer Verkehrssituation systematisch erfasst.

Auf dieser Grundlage können funktionale Szenarien systematisch beschrieben und abgeleitet werden (PEGASUS-4, 2019 S. 2).

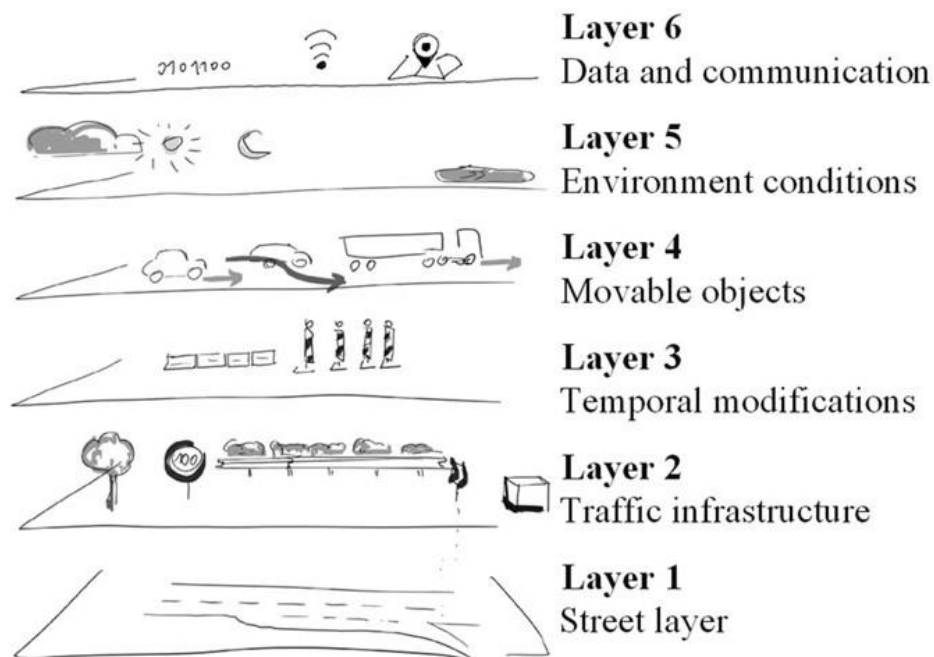


Abbildung 13 – 6-Schichten-Modell für Szenarios (Bock, et al., 2019)

In Abbildung 13 ist das 6-Schichten-Modell dargestellt. Die erste Schicht beschreibt die Straßengeometrie. Die Anzahl und Breite der Fahrstreifen bilden einen Teil dieser Einordnung. Die zweite Schicht gibt Informationen über die Verkehrsinfrastruktur. Dauerhafte Einrichtungen wie Verkehrszeichen und Lichtsignale werden genannt. Die dritte Schicht definiert temporäre Modifikationen. Das sind unter anderem Baustellenabschnitte und Straßensperrungen. In der vierten Schicht werden dynamische Objekte, wie Fahrzeuge und Fußgänger beschrieben. In der fünften Schicht werden die Umweltbedingungen spezifiziert. Dazu gehören zum Beispiel Wetter-, Licht- und Sichtverhältnisse. Die sechste Schicht definiert digitale Informationen in Hinsicht der Navigation und Kommunikation (PEGASUS-4, 2019 S. 3). Die dritte und sechste Schicht des Modells werden in der PEGASUS- Methode nicht detailliert beschrieben. Für die zu untersuchenden automatisierten Funktionen waren diese Bestandteile nicht relevant. Insbesondere die sechste Schicht könnte für die Teleoperation dagegen von sehr großer Relevanz sein. Diese Vermutung soll im Verlauf der Methodik untersucht werden. Die formale Beschreibung ermöglicht eine systematische und nachvollziehbare Identifikation von Szenarien. Verschiedene Klassen und Instanzen ermöglichen eine automatische und systematische Ableitung von Szenarien. Es werden Kombinationen der Entitäten und den Beziehungen zwischen den Entitäten generiert.

Der zweite Ansatz ist risikobasiert. Es wird konkret nach Situationen gesucht, in denen das System versagen könnte. Es sollen Sicherheitsrisiken und potenziell gefährliche Szenarien identifiziert werden. Die Beschreibung erfolgt in Parameterbereichen logischer Szenarien. Automatisierungsrisiken werden in Klassen eingeteilt. Für jede Klasse wurde eine eigene Methode entwickelt. In Klasse 1 werden Analysemethoden wie HAZOP und die Fehlerbaumanalyse verwendet. Im risikobasierten Ansatz wird die betrachtete Fahrfunktion modelliert und Abweichungen vom vorgesehenen Verhalten untersucht. In Klasse 2 sollen Abweichungen des Verhaltens der automatisierten Funktion zum menschlichen Verhalten und daraus resultierende kritische Situationen identifiziert werden. Die identifizierten Gefährdungen dienen als Grundlage zur Ableitung sicherheitskritischer Szenarien. Die dritte Klasse untersucht potenzielle Schwierigkeiten zwischen dem Fahrer und dem automatisierten System. Daraus resultieren jedoch Anforderungen an die HMI anstelle von Szenarien.

Neben ontologie- und risikobasierten Verfahren definiert der dritte Ansatz die Analyse durch Experten. Diese Experten sind Fachpersonen mit Domänenwissen im Bereich automatisierter Systeme. Fahrmanöver und Interaktionen zwischen Fahrzeugen werden untersucht und Szenarien formuliert. Dieser Ansatz basiert auf der vierten Schicht des 6-Schichten-Modells. Innerhalb dieses Ansatzes eignet sich insbesondere die Parametrisierung von Szenarien mithilfe von Messdaten (PEGASUS-4, 2019 S. 2). Es werden Objekte betrachtet deren Verhalten direkt messbar ist.

Der neunte Schritt der PEGASUS Methode behandelt die Zusammenführung zuvor definierter logischer Szenarien mit Szenariovarianten, die aus Messdaten extrahiert wurden. Logische Szenarien beschreiben Verkehrssituationen anhand von Parametern und zugehörigen Wertebereichen. Zur Bestimmung und Validierung dieser Bereiche werden reale Fahrdaten ausgewertet. Die identifizierten Szenarien, sowie die zugehörigen Parameterbereiche, werden in Datencontainern gespeichert und für die weitere Verwendung zur Verfügung gestellt (PEGASUS-9, 2019 S. 1).

In der PEGASUS-Methodik werden wissensbasierte und datenbasierte Verfahren zur systematischen Generierung von Szenarien kombiniert. Während Schritt 0 den Betrachtungsraum definiert, stellt Schritt 1 die Basis des Wissens und Schritt 2 die Herkunft der Daten bereit. In Schritt 4 erfolgt die Identifikation der Szenarien. Diese Szenarien werden anschließend in Schritt 9 durch Parameterbereiche beschrieben und mit Messdaten verknüpft.

Aus den vorliegenden Erkenntnissen geht hervor, dass ein weiterer Ansatz notwendig sei, um Szenarien in Hinsicht der Aufgabenstellung dieser Arbeit zu identifizieren. Insbesondere

die in der PEGASUS -Methodik verwendeten Datenquellen stehen in dieser Arbeit nicht zur Verfügung. Nancy Leveson hat die systemtheoretische Prozessanalyse entwickelt. Diese Analyse wird mit STPA abgekürzt. STPA betrachtet Interaktionen zwischen verschiedenen Komponenten. Zu diesen Komponenten gehören die Software, Hardware, der Bediener und die Führungskräfte (Thomas, et al., 2015 S. 1).

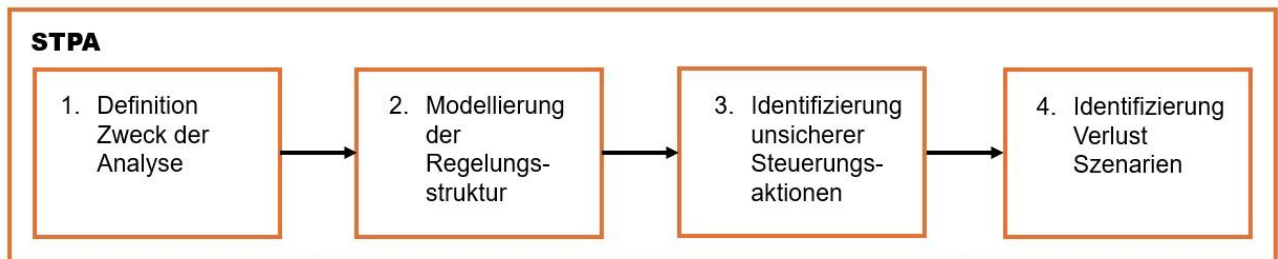


Abbildung 14 STPA-Methode - eigene Darstellung in Anlehnung an (Leveson, et al., 2018 S. 15)

Abbildung 14 stellt den Aufbau der STPA-Methodik dar. Die Analyse gliedert sich in vier Schritte. Schritt eins und zwei dienen der Vorbereitung. Die relevante Systemanalyse erfolgt in Schritt drei und vier.

Im ersten Schritt wird der Zweck der Analyse definiert. Darin inbegriffen sind Verluste, Gefahren und Anforderungen auf Systemebene. Optional werden die Gefahren präzisiert (Leveson, et al., 2018 S. 14). Ein Verlust kann materiell und immateriell sein. Materiell ist ein Fahrzeug- oder Personenschaden. Ein immaterieller Verlust ist zum Beispiel ein sinkendes Vertrauen in das technische System. Zuerst müssen die betroffenen Akteure identifiziert werden. Dazu gehören beispielsweise Operatoren, Nutzer und Produzenten. Anschließend werden die Werte und Ziele der Akteure bestimmt. Zuletzt wird jedes Ziel in einen möglichen Verlust umgewandelt. Die Verluste sollen keinem individuellen Teil des Systems zugeordnet werden. Die Ursache soll demnach nicht beschrieben werden. Eine Gefahr wird als ein Systemzustand oder eine Anzahl von Bedingungen definiert, die zu einem Verlust führen. Zur Identifizierung der Gefährdungen auf Systemebene müssen die Grenzen des Systems festgelegt werden (Leveson, et al., 2018 S. 14-15). Diejenigen Teile des Systems, über die die Entwickler eine gewisse Kontrolle besitzen, werden einbezogen. Eine Gefährdung kann zu mehreren Verlusten führen. Es gibt drei Kriterien für die Definition einer Gefährdung. Eine Gefährdung ist ein Systemstatus, oder eine Bedingung, die im schlechtesten Fall zu einem Verlust führt. Eine Gefährdung muss einen Status, oder eine Bedingung beschreiben, die verhindert werden soll (Leveson, et al., 2018 S. 18). Anschließend werden Einschränkungen auf Systemebene definiert. Diese Einschränkungen werden mit SC, aus dem Englischen für

„System Level Constraints“, abgekürzt. Es werden Systembedingungen oder ein Systemverhalten festgelegt. Eine Einschränkung kann zu mehreren Gefährdungen und diese wiederum zu mehreren Verlusten führen (Leveson, et al., 2018 S. 20). Es soll keine Lösung oder Implementierung vorgeschlagen werden. Zuletzt werden Gefährdungen auf Systemebene präzisiert. Diese Präzisierung ist optional und soll mit einem Nutzen verbunden sein. Gefährdungen können als Orientierung für weiteren Analysen in Teilgefährdungen eingeteilt und detailliert werden. Dafür werden zuerst Faktoren untersucht, die kontrolliert werden müssen, um eine Gefahr zu verhindern (Leveson, et al., 2018 S. 21).

Der zweite Schritt ist die Modellierung der Regelungsstruktur. Diese Struktur ist hierarchisch und besteht in der minimalen Anforderung aus einem Regler sowie einem internen Regelungsalgorithmus. Das Verhalten des Gesamtsystems wird durch die Struktur festgelegt. Entscheidungen und Steuerungsmaßnahmen werden durch den Regler veranlasst. Es wird der Prozess gesteuert und Vorgaben für das Verhalten des Prozesses definiert. Der gesteuerte Prozess kann einem physikalischen Prozess, oder einem weiteren Regler entsprechen. Der Entscheidungsprozess wird durch den Steuerungsalgorithmus gebildet (Leveson, et al., 2018 S. 22). Prozessmodelle bilden die internen Annahmen des Reglers ab, die ausschlaggebend für die Entscheidungsfindung sind. Rückmeldungen können Prozessmodelle aktualisieren (Leveson, et al., 2018 S. 23). Eine hierarchische Steuerungsstruktur wird in mindestens fünf Elementarten eingeteilt. Dazu gehören Steuerungsinstanzen, Steuerungsmaßnahmen, Rückmeldungen, Ein- sowie Ausgaben in Komponenten und gesteuerte Prozesse. Die vertikale Achse definiert Steuerungs- und Weisungsbefugnisse. Die nach unten gerichteten Pfeile sind Steuerungsmaßnahmen. Die nach oben gerichteten Pfeile sind Rückmeldungen (Leveson, et al., 2018 S. 25). Die Modellierung der Regelungsstruktur erfolgt schrittweise und beginnt zunächst abstrakt. Die enthaltenden Regelkreise können durch bereits vorhandene Anwendungen inspiriert und aufgebaut werden. Zuerst werden Teilsysteme identifiziert, die erforderliche Vorgaben einhalten und Gefahren verhindern. Die Regelungsstruktur wird präzisiert in dem die Steuerung jedes Teilsystems definiert wird (Leveson, et al., 2018 S. 27).

Der dritte Schritt identifiziert unsichere Steuerungsaktionen. Diese Aktionen werden als UCA, in Englisch für „unsafe controll action“, abgekürzt. Es werden vier Möglichkeiten definiert, die unsichere Steuerungsaktionen erzeugen. Im ersten Fall wird eine Aktion nicht ausgeführt. Eine Bremsung ist beispielsweise erforderlich und erfolgt nicht. Im zweiten Fall erzeugt eine ausgeführte Aktion eine Gefährdung. Eine ungewollte automatische Bremsung

kann eine Gefahr auslösen. Der dritte Fall beschreibt eine Aktion, die an sich richtig ist, aber zum falschen Zeitpunkt erfolgt. Eine Bremsung erfolgt beispielsweise zu spät. Der letzte Fall definiert eine Aktion, die entweder zu kurz oder zu lang ausgeführt wird. Die Bremsen werden beispielsweise nicht lang genug betätigt. Ein UCA soll die Bedingungen definieren, unter denen eine Aktion unsicher ist. Zu dem relevanten Kontext können Umgebungsbedingungen, der Status eines Prozesses, Steuerungszustände, vergangene, gleichzeitige oder widersprüchliche Aktionen und deren Parameter oder Eigenschaften sein. Ein UCA wird in fünf Teile untergliedert. Die Steuerungseinheit bildet den ersten Teil. Der zweite Teil ist die Art der Aktion, die als unsicher eingestuft wird. Der Steuerbefehl bildet den dritten Teil. Der vierte Teil ist der dazugehörige Kontext. Damit sind die bereits genannten relevanten Bedingungen gemeint. Im letzten Teil wird der Bezug zu den Gefährdungen gebildet. Nach der Identifizierung der UCA erfolgt die Übersetzung in Bedingungen zur Verhinderung.

Im vierten Schritt werden Verlust Szenarien identifiziert. Diese Szenarien werden in zwei Arten eingeteilt. In der ersten Ebene wird die Frage untersucht, warum unsichere Kontrollaktionen entstehen. In der zweiten Ebene wird untersucht, warum ein Befehl falsch oder gar nicht ausgeführt wurde. Zuerst sollen Szenarien identifiziert werden, die zu unsicheren Kontrollaktionen führen. Hierbei wird die UCA zu ihrem Ursprung zurück analysiert. Es soll beantwortet werden, weshalb die Steuerung die Aktion veranlasst oder unterlässt. Es kann beispielsweise zu Ausfällen der Verbindung zu physischen Steuerungen kommen. Ein Regelungsalgorithmus, der unzureichend implementiert oder fehlerhaft ist, definiert eine weitere Ursache (Leveson, et al., 2018 S. 43). Das Prozessmodell kann unzureichend sein. Parameter, die das mentale Modell des Systems definieren, können ungenau oder fehlerhaft sein. Die Realität wird somit für die notwendige Entscheidungsfindung nicht ausreichend abgebildet. Steuerungseingaben können unsicher sein. Sie können fehlen und fälschlicherweise, zum falschen Zeitpunkt oder im falschen Zeitintervall gegeben werden (Leveson, et al., 2018 S. 44). Diese Untergliederung wurde bereits im dritten Schritt untersucht. Zuletzt werden Szenarien identifiziert, in denen Aktionen unsachgemäß ausgeführt und nicht ausgeführt werden. Es werden Faktoren beachtet, die den Steuerungspfad und -prozess beeinflussen. Durch den Steuerungspfad werden Steuerungsaktionen an den Steuerungsprozess übertragen. Dieser Pfad kann aus einem oder eine Reihe von Aktuatoren bestehen. Zudem können weitere Geräte, wie Satelliten und Router als Netzwerk verwendet werden, um Aktionen zu übertragen. Es sollen unabhängig von der Implementierung Szenarien gefunden werden, die dazu führen, dass Aktionen fehlerhaft ausgeführt oder nicht ausgeführt werden. Zuerst werden Möglichkeiten untersucht, die zu einer fehlenden

Ausführung resultieren. Der Regler könnte beispielsweise eine Aktion senden, die jedoch nicht vom Aktor empfangen wird. Der Aktor könnte eine Aktion empfangen und dennoch nicht reagieren. Zudem könnte der Aktor reagieren, ohne dass die geregelte Aktion auf den Prozess angewendet wird. Im weiteren Verlauf werden Aktionen untersucht die fehlerhaft ausgeführt werden. Eine Regelaktion könnte fehlerhaft empfangen werden. Die Aktion könnte korrekt empfangen werden, jedoch unzureichend ausgeführt werden. Des Weiteren könnte der Aktor die Aktion richtig empfangen, aber dennoch fehlerhaft ausführen. Eine Aktion könnte ausgeführt werden, ohne die Sendung der entsprechenden Regelaktion. Die Ursachen dafür können beispielsweise Kommunikationsverluste und Übertragungsfehler. Energieverluste, Ungenauigkeiten, Abhängigkeiten von anderen Aktuatoren und beispielsweise Verschleiß können Ursachen für eine fehlende oder fehlerhafte Ausführung sein (Leveson, et al., 2018 S. 49). Szenarien können ebenso mit dem geregelten Prozess verbunden sein. In diesem Fall werden die Maßnahmen erfolgreich im Prozess empfangen und angewendet. Sie erreichen jedoch keine genügende Wirksamkeit oder werden von anderen Regelungseinheiten überschrieben. Der Prozess könnte nicht oder fehlerhaft reagieren. Der Prozess könnte so reagieren, als wäre eine Maßnahme empfangen und angewendet worden, ohne dass sie real empfangen oder angewendet wurde. Unzureichende Eingaben in den Prozess, externe Störungen, verzögerte Reaktionen und beispielsweise widersprüchliche, oder zuvor empfangene und ausgeführte Befehle könnten Ursachen für dieses Verhalten sein. Zur Generierung dieser Szenarien wird eine Kontrollmaßnahme ausgewählt und Faktoren untersucht, die eine unwirksame Kontrollmaßnahme durch den Prozess erzeugen (Leveson, et al., 2018 S. 1-2).

Im weiteren Verlauf soll eine dritte Möglichkeit vorgestellt werden Szenarios strukturell abzuleiten. Es wird zu diesem Zweck der Aufbau und Verwendungszweck von Entscheidungsbäumen beschrieben. Im Wesentlichen unterteilt ein Entscheidungsbaum Daten rekursiv in Teilmengen. Es werden die Werte verschiedener Attribute verwendet. Ein Pfad endet, sobald ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Es entsteht eine Struktur aus Verzweigungen, die bildhaft an einem Baum erinnert. Es sollen Entscheidungsprozess leicht verstanden und interpretiert werden. Anwender sollen Ergebnisse vertrauen und validieren können. Entscheidungsbäume können kategoriale und numerische Daten verarbeiten (MIENYE, et al., 2024 S. 1). Numerische Daten liegen in Form von Zahlen vor und können in Rechenoperationen verarbeitet werden. Kategorische Daten beschreiben Zugehörigkeiten zu Klassen oder Bezeichnungen. Der Entscheidungsbaum wird auch als White-Box-Klassifikationsmodell bezeichnet. Es wird transparent und nachvollziehbar vermittelt, welche Klassen verwendet

werden und auf welcher Grundlage sie entstehen. Es wird in vier verschiedenen Bestandteile unterschieden. Zu diesen Bestandteilen gehören Knoten und Kanten. Es wird zwischen inneren Knoten und Blattknoten unterschieden. Innere Knoten definieren Testbedingungen und Blattknoten definieren Klassenbezeichnungen. Die Kanten verbinden die Knoten. Kanten symbolisieren die möglichen Ergebnisse der Testbedingungen. Das Verfahren zum Aufbau eines Entscheidungsbaumes wird als Induktion von Entscheidungsbäumen bezeichnet und mit DTI abgekürzt. Die Abkürzung wird im Englischen als „Decision Tree Induction“ ausgeschrieben. Das Verfahren wird in drei Teile eingeteilt. Ein Aufteilungskriterium soll die Qualität der Testbedingungen messen. Der zweite Teil dient als Umgang mit numerischen und kategorialen Attributen. Der dritte Bestandteil ist ein Mechanismus zur Behandlung fehlender Werte. Des Weiteren wird das „Pruning“ beschrieben. Es erklärt das gezielte Entfernen von Ästen (Rivera-Lopez, et al., 2022). Ein Ast ist demnach ein Pfad innerhalb des Baumes, welcher auf Testbedingungen und dessen Ergebnissen basiert. Es wird in zwei unterschiedliche Arten von Entscheidungsbäumen unterteilt. Dazu gehören univariate und multivariate Entscheidungsbäume. Ein univariater Entscheidungsbaum basiert auf einem Attribut. Die Struktur ist dadurch leicht nachvollziehbar und transparent. Ein multivariater Entscheidungsbaum wird durch mehrere Attribute entwickelt. Es resultiert die Möglichkeit komplexere Zusammenhänge abzubilden. In Abhängigkeit der Komplexität sinkt die Nachvollziehbarkeit und Transparenz (Rivera-Lopez, et al., 2022 S. 2).

Die vierte Möglichkeit Anwendungsfälle zu identifizieren sind Ereignisbaumanalysen. Ereignisbäume analysieren mögliche Folgen eines Ausgangsereignisses. Es sollen alle möglichen Ergebnisse aufgezeigt werden, die aus dem auslösenden Ereignis resultieren. Es wird hierbei die Funktionalität von Sicherheitsbarrieren berücksichtigt. Das Ziel ist es unzureichende Auslegungen von Abläufen und Implementierungen zu identifizieren. Es sollen die Wahrscheinlichkeiten für die Folgen eines Störfalls bestimmt werden. Es wird im ersten Schritt mit einer signifikanten Abweichung begonnen. Dies kann ein menschliches Versagen, ein System und Ausrüstungsausfall oder eine Prozessstörung sein. Anschließend werden für jedes Ereignis mögliche Abläufe, Systemabhängigkeiten und bedingte Systemreaktionen bestimmt. Im nächsten Schritt sollen Barrieren identifiziert werden, die das Ereignis bewältigen. Dazu gehören beispielsweise Alarmer, automatische Sicherheitssysteme und automatische Erkennungssysteme. Im folgenden Schritt wird der Ereignisbaum gebildet. Das Starterereignis teilt sich in separate Baumzweige auf, die darstellen was geschieht, wenn die Verteidigungslinie erfolgreich ist oder versagt. Wenn eine signifikante Folge oder ein relevanter Aspekt identifiziert ist, endet die Verzweigung. Anschließend werden die

resultierenden möglichen Abläufe beschrieben. Danach wird die Häufigkeit der identifizierten Folgen berechnet. Zuletzt wird eine Zusammenstellung und Darstellung der Analyseergebnisse ausgearbeitet (IAEA, 1998 S. 27). Die Ursache –Wirkung–Beziehung ist innerhalb dieser Arbeit für die strukturierte Identifikation teleoperationsrelevanter Anwendungsfälle besonders von Interesse.

3.3 Szenariobewertung und Reduktion

Die bisher betrachteten Schritte der PEGASUS-Methode dienen der Generierung und Beschreibung von Szenarien. Aufbauend auf den bereits implizierten Wissens- und Datenquellen aus den Schritten 1 und 2 wird nun die Szenariobewertung und Reduktion betrachtet. Im Schritt 3 werden Methoden zur Anforderungsbewertung tolerierbarer Risiken untersucht. In diesem Ansatz werden Risikoanalysen, Gefahrenbestimmungen und Sicherheitsgenehmigungen untersucht. Die Risiko-Akzeptanz wird nach verschiedenen Akzeptanzprinzipien analysiert. Die Einführung automatisierter Systeme soll zu einer erhöhten Verkehrssicherheit beitragen. Makroskopische Sicherheitsanforderungen liegen im Fokus der Herleitung von Referenzen für akzeptable Risiken. Die Betrachtung stützt sich auf Unfallraten pro Kilometer. Das akzeptable Risiko ist abhängig von dem betroffenen Kreis der Nutzer und Verbreitung im Markt. Ist der Marktanteil sehr gering, steigen die Anforderungen an die Sicherheit. Sind die Benutzer des technischen Systems ausschließlich Experten aus diesem Bereich, so ist das akzeptierte Risiko größer als bei einer Person, die kein Fachwissen über das System besitzt (PEGASUS-3, 2019 S. 2).

Das Risiko wird durch den Faktor aus Häufigkeit und Schwere definiert. Es resultieren zwei Bereiche. Der sichere Zustand wird durch einen grünen und der unsichere Zustand durch einen roten Bereich dargestellt. Der sichere Zustand wird akzeptiert und unsichere Zustand wird nicht akzeptiert. Zwischen den Bereichen gibt es einen Übergangsbereich, welcher nicht eindeutig definiert ist. Diese Beschreibung ermöglicht eine Vergleichbarkeit von Risiken. Die mathematische Definition funktioniert für technische Risikoanalysen. Die Einzelperson bewertet das Risiko jedoch nicht ausschließlich auf die genannte Art. Relevante Aspekte für Privatpersonen sind beispielsweise die Kontrollierbarkeit, der persönliche Nutzen und eine Abneigung gegen hohe Schwere (PEGASUS-3, 2019). Führt der Nutzer das Fahrzeug selbst, ist die Risikoakzeptanz höher, da er selbst die Kontrolle hat. Ein Fahrzeug hat einen deutlichen Nutzen in der Hinsicht große Entfernungen in kleinen Zeiten zurückzulegen. Dieser Nutzen hat Einfluss auf die Akzeptanz des Risikos. Ohne einen derartigen

Nutzen, wäre die Risikoakzeptanz deutlich niedriger. Bei einer einzelnen großen Schadensschwere ist die Risikoakzeptanz ebenso geringer als bei vielen kleinen Schäden mit ähnlicher Eintrittswahrscheinlichkeit.

Bereits in den 1990er Jahren wurden quantitative Risikoanalysen durchgeführt und Sicherheitsanforderungen umgesetzt. Mit diesen Analysen wurden die Grundsätze ALARP, MEM und GAMAB eingeführt. ALARP beschreibt, dass Risiken mit einer gewissen Praktikabilität verbunden sein sollen. Ein unverhältnismäßiger technischer und wirtschaftlicher Aufwand zur Verringerung des Risikos rechtfertigt demnach ein Restrisiko. Der Grundsatz MEM definiert, dass ein neues System das Sterblichkeitsrisiko einer Person nicht wesentlich erhöhen darf. Der Grundsatz nach GAMAB verlangt den Vergleich des neuen Systems mit einem akzeptierten Referenzsystem. Die Restrisiken dürfen nicht größer sein als die des Referenzsystems. Das manuelle Fahren kann beispielsweise als Referenz zum automatisierten Fahren und der Teleoperation dienen.

Für die Szenarioreduktion und Bewertung reichen Risikoanalysen nicht aus. Im achten schritt der PEGASUS Methode werden vorhandene Daten und Signale gesammelt, verarbeitet und durch Metriken eingeordnet. Die gesammelten Daten werden zuerst auf Fehler überprüft. Diese Fehler werden korrigiert. Die Anforderungen an das System werden in einem Berechnungsbaum definiert. Es werden vier verschiedene Gruppen von Funktionen betrachtet. Dazu gehören abgeleitete Signale, Szenariowahrscheinlichkeiten, die Szenarioextraktion und Indikatoren. Für die Ableitung der Szenarien aus den Realdaten ist ein Filter erforderlich. Eine Metrik soll Szenarien mit erhöhter Fahrenforderung erkennen. Eine bekannte Metrik ist die „Worst-Time-to-Collision“. Mithilfe der Metrik soll die Kritikalität des Szenarios beschrieben und die Sicherheit beurteilt werden. Zu diesem Zweck sind die Fahrenforderungen notwendig, die wiederum vom Szenario abhängig sind. Diese Anforderungen bestehen aus drei Bestandteilen. Der erste Bestandteil ist die notwendige Beschleunigung in Quer- und Längsrichtung. Der zweite Bestandteil ist die Korrektur des Kurswinkels. Hiermit wird der Seitenabstand kontrolliert. Der dritte Bestandteil definiert die Geschwindigkeitskorrektur, wobei der Abstand nach vorn abgesichert wird. Es wird zwischen posteriori-Metriken, sowie Metriken mit deterministischer und probabilistischer Vorhersage der Trajektorien unterteilt. Posteriori-Metriken basieren auf vorhanden Daten.

Die PEGASUS Methode basiert auf einer sehr großen Menge von Wissen und Datenquellen. Die Methodik in dieser Arbeit wird hauptsächlich Wissensquellen wie internationale Richtlinien, Normen und Standards als Grundlage nutzen. Datenquellen von

Fahrversuchen, Feldversuchen und Untersuchungen des natürlichen Realverkehrs sind in diesem Ausmaß für diese Arbeit nicht verfügbar. Die Arbeit wird sich dennoch auf den Daten von begrenzten Studien, die im Verlauf der Literaturrecherche untersucht wurden, stützen.

Die ISO26262 handelt über die Funktionale Sicherheit von Straßenfahrzeugen. Die Norm besteht aus 12 Teilen. Der dritte Teil untersucht die Konzeptphase. Im sechsten Kapitel erfolgen die Gefahrenanalyse und Risikobewertung. Es wird die Abkürzung HARA, aus dem Englischen für „Hazard Analysis and Risk Assessment“ verwendet. In dieser Methode wird eine Gefährdung in Hinsicht des Schweregrads (S), der Expositionswahrscheinlichkeit (E) und der Kontrollierbarkeit (C) bewertet. In dieser Risikobewertung werden gefährdete Personen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs beachtet, welches die Ursache für das zu betrachtende Ereignis ist. Die „Abbreviated Injury Scale“, abgekürzt (AIS) dient als mögliche Charakterisierung des Schweregrades. Der Schweregrad wird als „Einschätzung des Ausmaßes des Schadens für eine oder mehrere Personen, der bei einem potenziell gefährlichen Ereignis auftreten kann“ (ISO26262-1, 2018 S. 24), definiert. AIS ist eine Richtlinie zum internationalen Vergleich der Verletzungsschwere (Hamburg, 2026). Der Schweregrad kann auf Kombinationen der Ursachen, wie einer Verletzung basieren. Der Schweregrad wird in vier Klassen mit der Bezeichnung S0 bis S3 eingeteilt. Daraus resultiert, dass nicht alle Szenarien dieselben Konsequenzen haben und unterschiedlich bewertet werden. Ein Schaden kann ohne ein Fehlverhalten des Systems entstehen und durch ein Fehlverhalten vergrößert werden. Diesen zusätzlichen Schaden kann durch die Schweregrad Betrachtung beachtet werden. Die Expositionswahrscheinlichkeit wird auf Grundlage einer Begründung für jedes Ereignis geschätzt. Sie beschreibt die Häufigkeit in Bezug auf das Befinden eines Systems in einer Betriebssituation. In dieser Situation führt ein Fehlverhalten zu einer Gefährdung (ISO26262-1, 2018 S. 1). Die Komponente des Systems, die mit der Ursache des Fehlverhaltens verbunden ist, muss in jedem Fahrzeug vorhanden sein, dass betrachtet wird. Die Expositionswahrscheinlichkeit wird in fünf Klassen von E0 bis E4 eingeteilt. Die Kontrollierbarkeit ist die Fähigkeit eine spezifische Gefährdung oder einen Schaden zu verhindern. Ausschlaggebend sind die Reaktionen der involvierten Personen. Externe Messdaten können den Prozess unterstützen (ISO26262-1, 2018 S. 6). Diese Beherrschbarkeit ist auf der Grundlage einer geeigneten Begründung in Bezug auf die beteiligten Entitäten abzuschätzen. Die Beherrschbarkeit wird in vier Klassen C0, C1, C2 und C3 eingeteilt. Zwischen diesen Klassen liegt eine Größenordnung. Ein Ereignis der Klasse C2 ist demnach zehnmal schwieriger zu kontrollieren als ein Ereignis der Klasse C1. Die Beherrschbarkeit schätzt die Wahrscheinlichkeit ab ausreichend Kontrolle über das Ereignis zu erlangen, um

den Schaden abzuwenden. Der Fahrer muss als Voraussetzung eine geeignete Fahrerlaubnis besitzen und sich in einem Zustand befinden, der ein sicheres Fahren gewährleistet. Der Fahrer darf beispielsweise nicht übermüdet sein. Typische Fehlanwendungen, wie ein zu geringer Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug werden berücksichtigt. Vorschriften, die ein funktionales Verhalten in Hinsicht eines gefährlichen Ereignisses definieren, können einen Einfluss auf die Beherrschbarkeitsklasse haben und als Begründung dienen. Es müssen die Anwendbarkeit und die entsprechenden Nachweise vorliegen. In einer Vorschrift könnte beispielsweise ein Verzögerungswert bei einem Fehler für den Bedarf einer Notbremsung festgelegt sein. Geht daraus hervor, dass die Gefahr durch diese Anforderung abgewendet wird, kann sie die Argumentation über eine Einstufung der Beherrschbarkeit begründen.

Im folgenden Verlauf wird auf Grundlage der Einstufung des Schweregrads, der Expositionswahrscheinlichkeit und der Beherrschbarkeit ein ASIL bestimmt. ASIL ist eine Abkürzung und bedeutet „Automotive Safety Integrity Level“. Es erfolgt eine Einstufung in fünf Sicherheitsstufen ASIL QM, ASIL A, ASIL B, ASIL C und ASIL D. Es wird festgelegt welche Anforderungen nach der ISO26262 für das betrachtete System und die Komponenten gelten. In der Stufe QM sind keine Anforderungen nach der ISO26262 erforderlich. Je höher der ASIL, desto größer sind die Anforderungen. Der größte ASIL-Wert ist demnach ASIL D. Es wird zudem festgelegt, welche Sicherheitsmaßnahmen umgesetzt werden müssen. Die ASIL-Einstufung dient der Minimierung des Risikos auf einen akzeptablen Wert (ISO26262-1, 2018 S. 2).

Ein Risikograph ist eine Methode zur Bestimmung von Sicherheitsintegritätsstufen (SIL). Dafür werden Prozessrisikofaktoren oder Parameter für Gefahrenereignisse verwendet. In den meisten Fällen werden vier Parameterwerte kombiniert. Es soll das Risiko des Gefahrenereignisses abgeschätzt werden (Baybutt, 2006 S. 1). Ein Parameter W stellt die Häufigkeit des Eintretens des Gefahrenereignisses dar. Die Kombination der anderen Parameter C, P und F stellen die effektive Auswirkung dar. Der Parameter F steht für die Aufenthaltsdauer. Der Parameter P stellt die Wahrscheinlichkeit der Gefahrenvermeidung dar. Der Parameter C beschreibt die Auswirkung des Ereignisses (Baybutt, 2006 S. 2). Die SIL-Werte werden durch den Rahmen der IEC-Normen festgelegt. Dazu gehören die IEC 61508 und die IEC 61511. Es werden jedoch keine spezifischen SIL-Werte durch die Normen vorgeschrieben (R. Nait-Said, 2008 S. 1). Die IEC 61508 differenziert in vier Sicherheitsintegritätsstufen. Dazu gehören SIL-1, SIL-2, SIL-3 und SIL-4. Der Risikograph wird als

qualitative Methode zur Bestimmung des SIL-Wertes eingeordnet. Eine Matrix zur Schwere gefährlicher Ereignisse ist eine weitere qualitative Methode. Die Fehlerbaumanalyse ist beispielsweise eine quantitative Methode. Eine Sicherheits-Ebenen-Matrix wird als semi-quantitative Methode eingeordnet.

Die betrachteten Ansätze zur Bewertung und Reduktion von Szenarien erfolgt auf verschiedenen Ebenen. Die Grundsätze der Risikoakzeptanz wie ALARP, MEM und GAMAB erzeugen eine Einordnung akzeptabler Risiken. Innerhalb der PEGASUS Methode werden zudem Metriken verwendet, die einzelnen Szenarien auf Basis messbarer Größen quantitativ bewerten. Nach der ISO26262 werden gefährliche Ereignisse in Schweregrad, Exposition und Beherrschbarkeit klassifiziert. Analog werden Szenarien nach der IEC 61508 in Kriterien klassifiziert und ein SIL-Wert bestimmt. Die Grundlegende Bewertungslogik, nach der die Szenarien anhand definierter Kriterien klassifiziert und priorisiert werden, ist für die vorliegende Arbeit besonders relevant.

4 Methodik zur Ableitung und Bewertung teleoperationsrelevanter Anwendungsfälle

In diesem Kapitel wird die Methodik vorgestellt, welche im Verlauf dieser Diplomarbeit entwickelt wurde. Mithilfe dieser Methodik sollen Anwendungsfälle zur Teleoperation eines automatisierten Verkehrssystems abgeleitet werden. Mindestens ein oder mehrere Anwendungsfälle in Summe bilden ein Szenario. Ein wichtiger Baustein ist hierbei das 6-Schichten-Modell der PEGASUS-Methode. In Verbindung mit der Entwicklung schichtabhängiger Ereignisbäume sollen die Anwendungsfälle identifiziert werden. Auf dieser Identifizierung liegt somit der Fokus dieser Arbeit. Anschließend werden die Anwendungsfälle zu einem Szenario zusammengesetzt. Im nächsten Schritt erfolgt eine Plausibilitätsprüfung, die die allgemeine Sinnhaftigkeit und Umsetzbarkeit der Teleoperation beurteilt. Im letzten Schritt erfolgt die Bewertung durch einen Risikographen.

4.1 Abgrenzung des Betrachtungsraums

Die Möglichkeiten eine Teleoperation einzusetzen sind ohne eine sinnvolle Begrenzung unendlich. Im ersten Schritt der entwickelten Methodik soll daher der Betrachtungsraum ausgewählt und somit eingegrenzt werden. Der Anwender dieser Methodik soll in zwei Kategorien eine Auswahl treffen. Es wird zwischen vier globalen Standorten und zwei Betrachtungsarten unterschieden. Die Eingrenzung des Betrachtungsraum führt zu logischen Ausschlüssen von möglichen Anwendungsfällen in Abhängigkeit der ausgewählten Kategorien. Der ausgewählte Betrachtungsraum hat somit einen direkten Einfluss auf die weiterführende Methodik und den daraus resultierenden Anwendungsfällen. Es wird somit ein erster strukturierender Effekt erzielt. Die erste Kategorie definiert den globalen Standort des EGO-Fahrzeugs. Der globale Standort wird aus der Autobahn, der Landstraße, der Innenstadt und dem Betriebsgelände gewählt. Diese Standorte unterscheiden sich im Geltungsbereich der Straßenverkehrsordnung und besonders im Geschwindigkeitsbereich des EGO-Fahrzeugs, wie auch anderer Verkehrsteilnehmer. Auf der Autobahn wird ein Geschwindigkeitsbereich von ≤ 130 km/h angenommen. Auf der Landstraße ist ein Geschwindigkeitsbereich von ≤ 100 km/h anzunehmen. Die Innenstadt ist auf einen Bereich von ≤ 50 km/h begrenzt. Auf Betriebsgeländen wird ein Geschwindigkeitsbereich von ≤ 30 km/h angenommen. Die Zahlenwerte beschreiben somit Maximalwerte. Es kann auch standortbedingt eine

geringere Geschwindigkeit gelten. Auf der Autobahn, der Landstraße und innerstädtischen Straßen gilt die Straßenverkehrsordnung. Im Betriebsgelände gilt die Straßenverkehrsordnung nicht. Die nächste Kategorie bezeichnet die Betrachtungsart. Es wird unterschieden, ob der globale Standort allgemein oder ortsspezifisch untersucht wird. Erfolgt die Betrachtung ortsspezifisch, wird ein realer geografischer Verkehrspunkt untersucht. Ein mögliches Beispiel hierfür wäre der Alberplatz in der Neustadt Dresden. Jede Auswahl ist eine Annahme und gilt nicht grundsätzlich. Die letzte Kategorie soll den Zustand des Fahrzeugs darstellen. In welchem Zustand benötigt das Fahrzeug eine teleoperative Unterstützung? Befindet es sich gerade im Stillstand oder in Bewegung?

Auswahl Betrachtungsraum	
Standort global	
Autobahn	x
Landstraße	
Innenstadt	
Betriebsgelände	
Betrachtungsart	
Allgemein	x
Ortspezifisch	
Adresse:	

Abbildung 15 – Betrachtungsraum – eigene Darstellung

In Abbildung 15 wird die Auswahl des Betrachtungsraums dargestellt. Als globaler Standort wurde die Autobahn angenommen. Die Betrachtung erfolgt vorerst allgemein. Eine ortsspezifische Betrachtung an einem Verkehrsknotenpunkt erhöht die Komplexität erheblich.

Des Weiteren gelten allgemeine Systemannahmen. Das EGO- Fahrzeug verfügt über ein automatisiertes System. Es ist jedoch nicht in der Lage jede Fahraufgabe, in jedem Betriebsbereich ohne menschlichen Eingriff zu lösen. Es kann technisch sowohl indirekt wie auch direkt teleoperiert werden. Das Fahrzeug kann eigenständig in einen risikominimalen Zustand übergehen, wenn eine Fahraufgabe nicht eigenständig lösbar ist.

Es wird angenommen, dass eine zeitnahe Wiederaufnahme der Fahrt angestrebt wird. Die teleoperative Unterstützung soll den Anwendungsfall überwinden und eine Fortsetzung der Fahrt ermöglichen. Insbesondere im kommerziellen Bereich soll eine Teleoperation Verzögerungen im Betriebsablauf vermeiden und Beeinträchtigungen des Verkehrsflusses reduzieren.

Ortsspezifische Betrachtung

Die Ortsspezifische Betrachtung beginnt mit der Festlegung des Untersuchungsortes. Dieser Ort kann beispielsweise ein Straßenabschnitt, eine Anschlussstelle oder ein Verkehrsknotenpunkt sein. Es muss die genaue geografische Lage bekannt sein.

Im folgenden Schritt soll die Datengrundlage festgelegt werden. Es können Luft- und Satellitenbilder, Straßenansichten, Kartenmaterial und ergänzend gegebenenfalls Daten des Infrastruktur- oder Verkehrs verwendet werden.

Im nächsten Schritt soll der Betrachtungsraum in relevante Teilbereiche unterteilt werden. Es soll kein starres Raster verwendet werden. Der Ort wird anhand seiner Verkehrsstruktur in sinnvolle Teilbereiche unterteilt. Mögliche Teilbereiche könnten Kreuzungsbereiche, Einmündungen, Haltbereiche, Straßenbahnquerungen oder Punkte mit intensiven Fußgängerverkehr sein.

Anschließend sollen anhand der PEGASUS - Schichten die für den Teilbereich vorkommenden Elemente und Verhaltensweisen erfasst werden. Es soll demnach die Frage beantwortet werden, welche relevanten Elemente der Schichten ortsspezifisch vorkommen. Die identifizierten Informationen sollen anschließend im weiteren Verlauf verwendet werden. Ab diesem Punkt wird die allgemeine und ortsspezifische Betrachtung nach demselben Ablauf weitergeführt.

4.2 Identifikation teleoperationsrelevanter Anwendungsfälle

Die entwickelte Methodik zur Ableitung teleoperationsrelevanter Anwendungsfälle verbindet das 6-Schichten-Modell nach PEGASUS mit schichtspezifischen Ereignisbäumen. Jeder Anwendungsfall soll zur Identifizierung als Momentaufnahme betrachtet werden. In der Realität können Anwendungsfälle parallel oder aufeinanderfolgend eintreten. Im Verlauf der Ausarbeitung wurde festgestellt, dass alle Schichten einen teleoperativen Bedarf auslösen können. Zuerst wird das allgemeine Schema schichtunabhängig vorgestellt. Anschließend wird im folgenden Kapitel die Ableitung der Anwendungsfälle verdeutlicht. Die Ereignisbäume, die den Bedarf einer Teleoperation identifizieren, wurden mit dem Open-Source-

Modell yEd – Graph Editor erstellt. Mit dem schichtunabhängigen Schema und dieser frei verfügbaren Software ist es somit möglich die Methodik selbst anzuwenden. Der Editor ist eine leistungsstarke Desktop- Anwendung zur Erstellung hochwertiger Ereignisbäume und Diagramme (yworks, 2026). Es soll sichergestellt werden, dass die Methodik für alle Schichten anwendbar ist. Daher wird das Schema in diesem Kapitel für jede Schicht einmal angewendet.

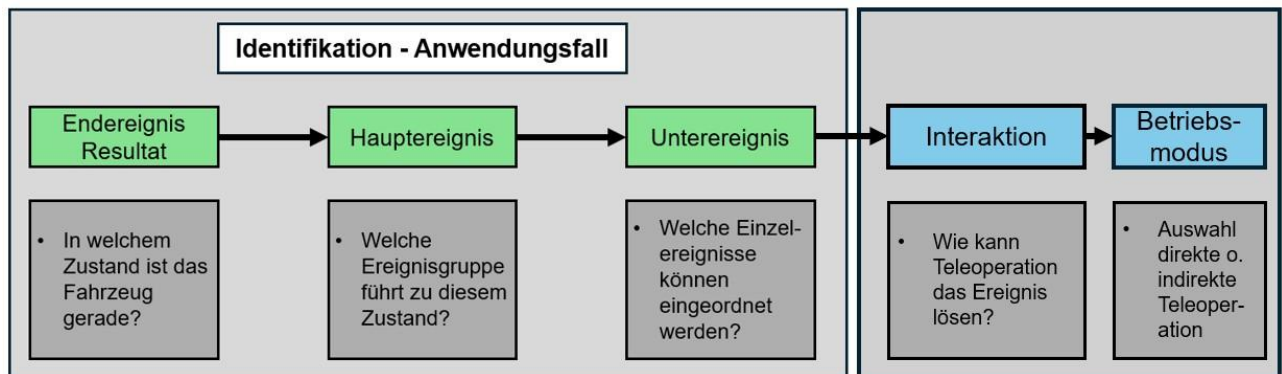


Abbildung 16 – Identifikationskette Anwendungsfall – eigene Darstellung

In Abbildung 16 ist der entwickelte Ablauf zur Identifikation eines Anwendungsfalles vereinfacht abgebildet. Es ist nicht der reale Ablauf des Anwendungsfalles dargestellt. Dieser reale Ablauf wird erst nach der Identifikation, im Kapitel [4.3 Ableitung des Anwendungsfalles](#), definiert. Der Ausgang der Betrachtung ist ein Fahrzeugzustand. Das Fahrzeug befindet sich beispielsweise im Stillstand und kann nicht mehr eigenständig weiterfahren. Im nächsten Schritt wird die Frage beantwortet, welche Ereignisgruppen zu diesem Zustand führen können. Eine Ereignisgruppe wird als Hauptereignis bezeichnet. Im nächsten Schritt werden Unterereignisse in das Hauptereignis eingeordnet. Das Unterereignis ist der entscheidende Auslöser für den Anwendungsfall. Der eigentliche Anwendungsfall ist somit mit dem Unterereignis identifiziert. Innerhalb dieser Methodik wird in zwei zusätzlichen Schritten eine notwendige Interaktion und dem daraus resultierenden Betriebsmodus identifiziert. Es soll die Frage beantwortet werden, wie die Teleoperation den Anwendungsfall lösen kann. Die Lösung erfolgt durch eine Interaktion. Es wird eine begrenzte Anzahl an Interaktionen festgelegt. Die möglichen Interaktionen sind eindeutig in die indirekte oder direkte Teleoperation eingeordnet. Aus der festgelegten notwendigen Interaktion resultiert demnach der notwendige Betriebsmodus.

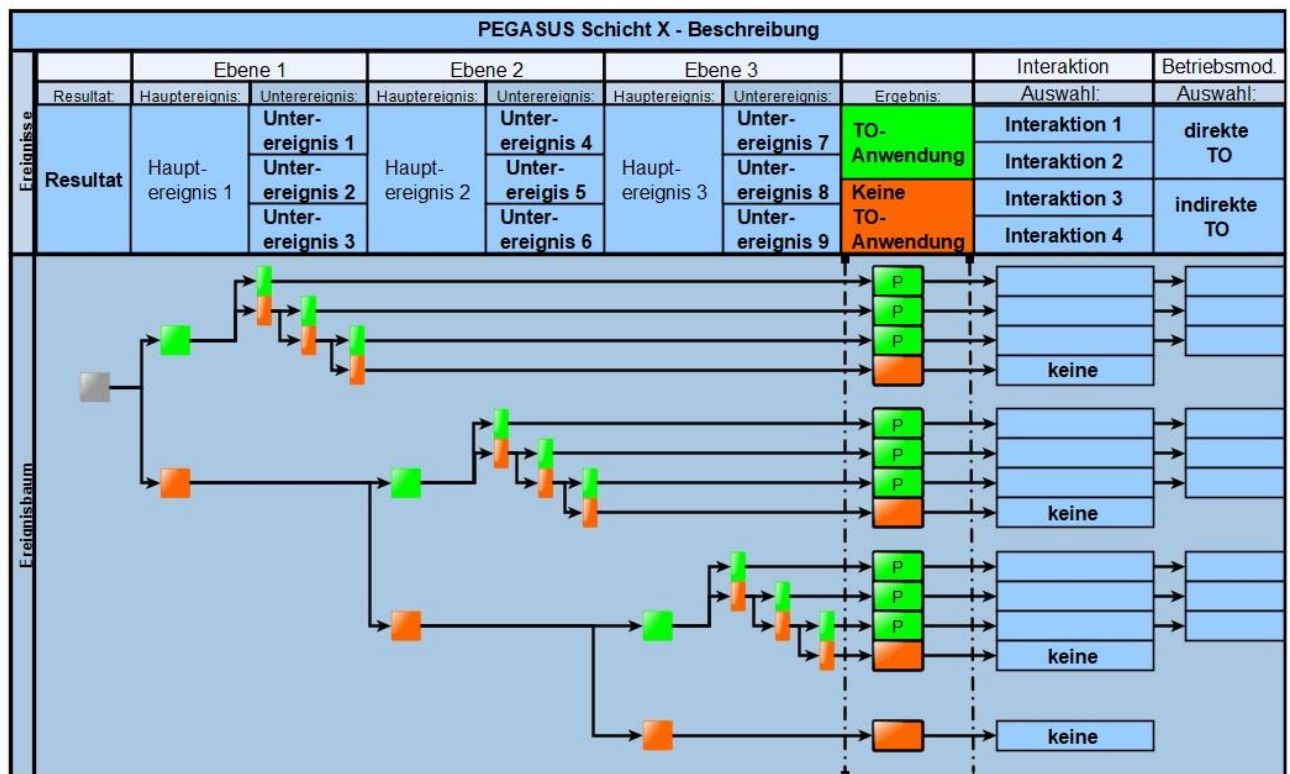


Abbildung 17 – Identifikationsschema allgemein – eigene Darstellung

Abbildung 17 zeigt das schichtunabhängige allgemeine Identifikationsschema der Anwendungsfälle. Zuerst wird eine der sechs Schichten nach PEGASUS ausgewählt und eingetragen. Die genauen Bestandteile jeder Schicht richten sich nach dem Stand der Forschung innerhalb der PEGASUS Methodik, die im Kapitel [3.2 Methoden der Szenariogenerierung](#) vorgestellt wurde. Zur Ableitung des Anwendungsfalls wird die Kausalkette, die den Anwendungsfall definiert rückwärts gebildet. Innerhalb der Methodik wird mit dem letzten Ereignis, welches das endgültige Resultat darstellt, begonnen. Anschließend werden Ereignisgruppen gebildet, die zu diesem endgültigen Resultat führen. Die Ereignisgruppen werden übergeordnet als Hauptereignis bezeichnet. Es können somit drei Hauptereignisse gebildet werden. Innerhalb von jedem Hauptereignis können bis zu drei Unterereignisse eingeordnet werden. Diese Unterereignisse stellen den spezifischen Grund des Anwendungsfalls dar. In der Realität führt somit das Unterereignis zu einem Hauptereignis. Das Hauptereignis führt wiederum zu einem Endereignis. Das Endereignis wird hierbei als Resultat bezeichnet. Tritt das erste Hauptereignis nicht ein, wird das zweite Hauptereignis unabhängig vom ersten Hauptereignis betrachtet. Diese Vorgehensweise soll durch die Darstellung des Ereignisbaums verdeutlicht werden. Ein Hauptereignis tritt ein, wenn der Pfad durch einen grünen Block führt. Analog tritt ein Unterereignis ein, wenn der Pfad durch einen grünen Block führt. Aus dieser Festlegung wird der Ereignisbaum begrenzt. Würden an jede Pfadmöglichkeit

des ersten Hauptereignisses, alle folgenden möglichen Ereignisse angebunden werden, wächst der Ereignisbaum exponentiell. Dieser Ereignisbaum würde alle möglichen Anwendungsfälle in allen Kombinationen darstellen. Man müsste in Folge beurteilen welche Abhängigkeit zwischen den Anwendungsfällen bestehen. Da der Sinn dieser Methodik die Ableitung von Anwendungsfällen bildet, wird jeder Fall zunächst einzeln abgeleitet und am Ende der Methodik auch einzeln bewertet. Das vorgestellte Identifikationsschema ermöglicht somit die Ableitung von maximal neun Anwendungsfällen in jeder Schicht pro Durchlauf. Ist das Unterereignis eingetreten, wird Zuordnung zu der Kategorie TO- Anwendung, grün dargestellt, getroffen. Es wurde somit ein teleoperationsrelevanter Anwendungsfall identifiziert. Tritt das Unterereignis nicht ein, so werden die folgenden Unterereignisse betrachtet. Tritt kein Unterereignis ein, so wird die Zuordnung keine TO- Anwendung, orange dargestellt, getroffen. Tritt kein Hauptereignis ein, so wird ebenso die Zuordnung keine TO- Anwendung, orange dargestellt, getroffen. Ist ein Unterereignis identifiziert, wird im nächsten Schritt eine Interaktion ausgewählt, die eine Teleoperation charakterisieren und die Fahraufgabe lösen soll. Es wird aus vier möglichen Interaktionen ausgewählt. Zwei Interaktionen sollen eine indirekte und zwei weitere eine direkte Teleoperation auslösen. Das Ende des Pfades ist somit die Zuordnung zum notwendigen Betriebsmodus.

Innerhalb der internen Anwendung werden vier Interaktionen festgelegt, wobei eine Interaktion jedem Anwendungsfall zugeordnet wird. Diese Interaktion soll den Eingriff widerspiegeln, welcher die größte Relevanz innerhalb des Anwendungsfalls besitzt. Die direkte Teleoperation wird durch einen direkten Eingriff in die Querführung oder Längsführung des Fahrzeugs beschrieben. Die indirekte Teleoperation wird durch die Entscheidungsfindung und Umfelderkennung beschrieben. Diese Interaktionen sind zur Untersuchung der Methodik bewusst allgemein gehalten. Aus der notwendigen Interaktion wird der notwendige Betriebsmodus abgeleitet.

Die Querführung definiert das seitliche Fahrverhalten des Fahrzeugs. Es werden Lenkbewegungen eingeleitet, die Fahrtrichtung angepasst und somit die Spurführung übernommen. Zu der Querführung können Spurwechsel, Spurhalten, Ausweichen oder Einlenken in eine Kurve zählen. Die aktive Übernahme der Querführung wird in dieser Arbeit als Interaktion der direkten Teleoperation eingeordnet.

Die Längsführung definiert das Fahrverhalten in Fahrtrichtung. Es werden Beschleunigungs- und Verzögerungsaktionen eingeleitet. Zu der Längsführung können Anfahren, Bremsen, Geschwindigkeitsanpassungen und der Stillstand des Fahrzeuges zählen. Die

aktive Übernahme der Längsführung wird in dieser Arbeit als Interaktion der direkten Teleoperation eingeordnet.

Die Entscheidungsfindung definiert die Auswahl einer Handlungsstrategie. Es werden Aktionen zur Fortsetzung der Fahrsituation festgelegt. Es können beispielsweise mögliche Fahrwege durch das automatisierte System vorgeschlagen und ausgewählt werden. Ein weiteres Beispiel ist die Vergabe von Wegpunkten zur Generierung des Fahrweges. Die Entscheidungsfindung wird in dieser Arbeit als Interaktion der indirekten Teleoperation eingeordnet. Die Entscheidungsfindung wird innerhalb der Methodik als Entscheidung abgekürzt.

Die Umfelderkennung definiert die Interpretation der Fahrzeugumgebung. Es sollen relevante Informationen für die Fortsetzung der Fahraufgabe erfasst werden. Es müssen beispielsweise Hindernisse erkannt werden. Zu diesen Hindernissen können dynamische Objekte wie Fußgänger, Tiere, andere Fahrzeuge, oder statische Objekte gehören. Statische Objekte sind beispielsweise Elemente der Infrastruktur, wie Verkehrsschilder und Begrenzungen. Des Weiteren kann eine Einschätzung über Beschädigungen der Fahrbahn oder der Infrastruktur getroffen werden. Die Umfelderkennung wird in dieser Arbeit als Interaktion der indirekten Teleoperation eingeordnet. Die Umfelderkennung wird innerhalb der Methodik als Erkennung abgekürzt.

Für jeden Anwendungsfall soll im letzten Schritt der Identifikation eine Wahrscheinlichkeit gegeben werden. Es soll angegeben werden in wie vielen Fällen des realen Auftretens des Anwendungsfalls tatsächlich eine Teleoperation notwendig ist. Diese Wahrscheinlichkeiten sind Annahmen und beruhen nicht auf nachgewiesenen Daten. Die Wahrscheinlichkeit wird somit geschätzt. Die Wahrscheinlichkeit wird in folgenden Schritten innerhalb der Bewertung weiterverarbeitet. Es wird zwischen drei unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitswerten gewählt. Für eine geringe Wahrscheinlichkeit wurde der Wert 0,01 festgelegt. Das entspricht einem prozentualen Wert von 1%. Für einen Anwendungsfall mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit wurde der Wert 0,1 festgelegt. Dies entspricht einem prozentualen Wert von 10%. Für einen Anwendungsfall mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wurde der Wert 0,5 festgelegt. Das entspricht einem prozentualen Wert von 50%. Es wird definiert mit welcher Wahrscheinlichkeit eine der vorliegende Anwendungsfall real auftritt und zugleich eine Teleoperation notwendig ist.

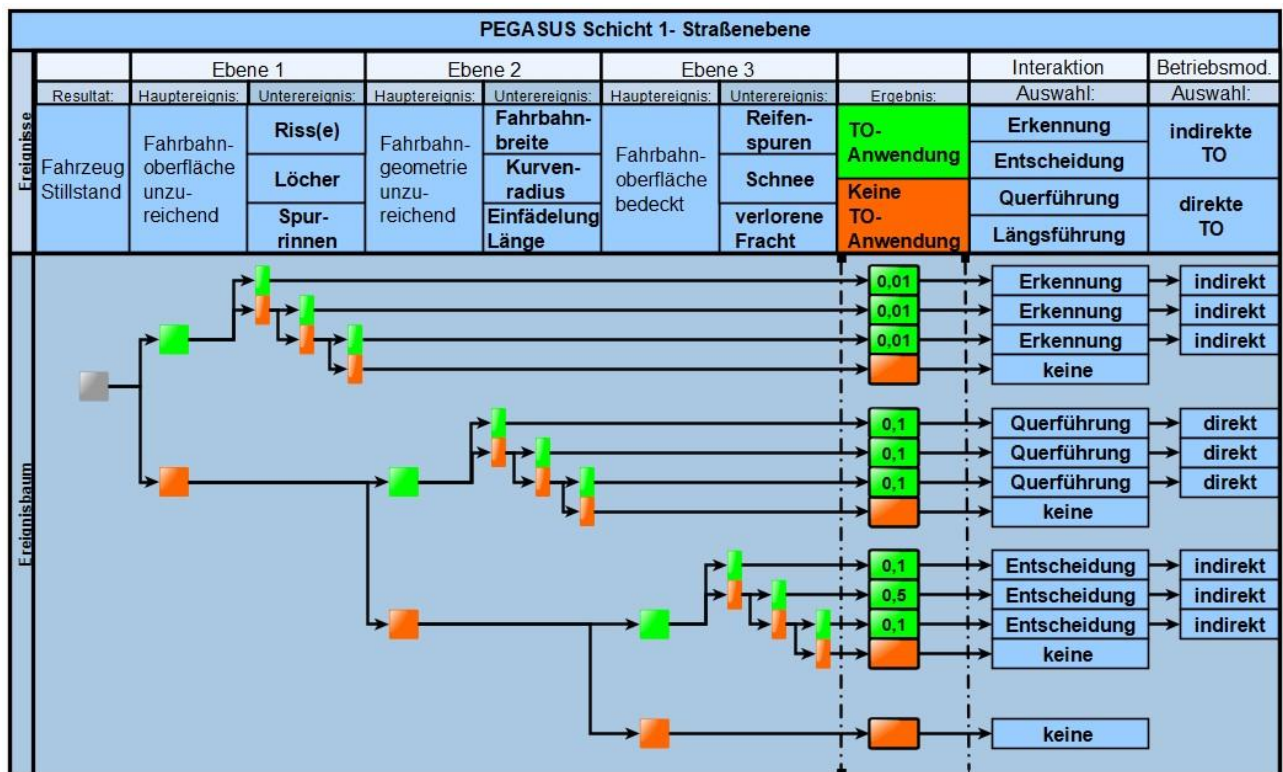


Abbildung 18 – Identifikation Straßenebene – eigene Darstellung

In Abbildung 18 ist die Anwendung des Identifikationsschemas nach Schicht 1 – Straßenebene dargestellt. Das Endereignis, als Resultat bezeichnet, ist der Fahrzeug Stillstand. Das System kann somit nicht eigenständig weiterfahren. Der Fahrzeug Stillstand ist der Ausgang der Betrachtung. Das erste Hauptereignis ist eine unzureichende Fahrbahnoberfläche. Aus diesem Hauptereignis wurden die drei Unterereignisse Risse, Löcher und Spurrinnen in der Fahrbahnoberfläche identifiziert. Es besteht ein Bedarf die Oberflächenbeschaffenheit der Fahrbahnoberfläche zu erkennen und zu bewerten. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Umfelderkennung. Das zweite Hauptereignis definiert eine unzureichende Fahrbahngeometrie. Als Unterereignis wurden eine unzureichende Fahrbahnbreite, ein unzureichender Kurvenradius und eine unzureichende Einfädelungslänge festgelegt. Es folgt die Herausforderung das Fahrzeug innerhalb des begrenzten Raums zu führen. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Querführung. Das dritte Hauptereignis ist eine bedeckte Fahrbahnoberfläche. Reifenspuren, Schnee oder verlorene Fracht sollen Teile der Straßenebene überdecken. Es soll über die weitere Vorgehensweise in Form einer Handlungsstrategie entschieden werden. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Entscheidungsfindung. Im Kapitel [4.3 Ableitung der Anwendungsfälle](#) werden gewählte Beispiele in realer Abfolge erneut beschrieben und untersucht.

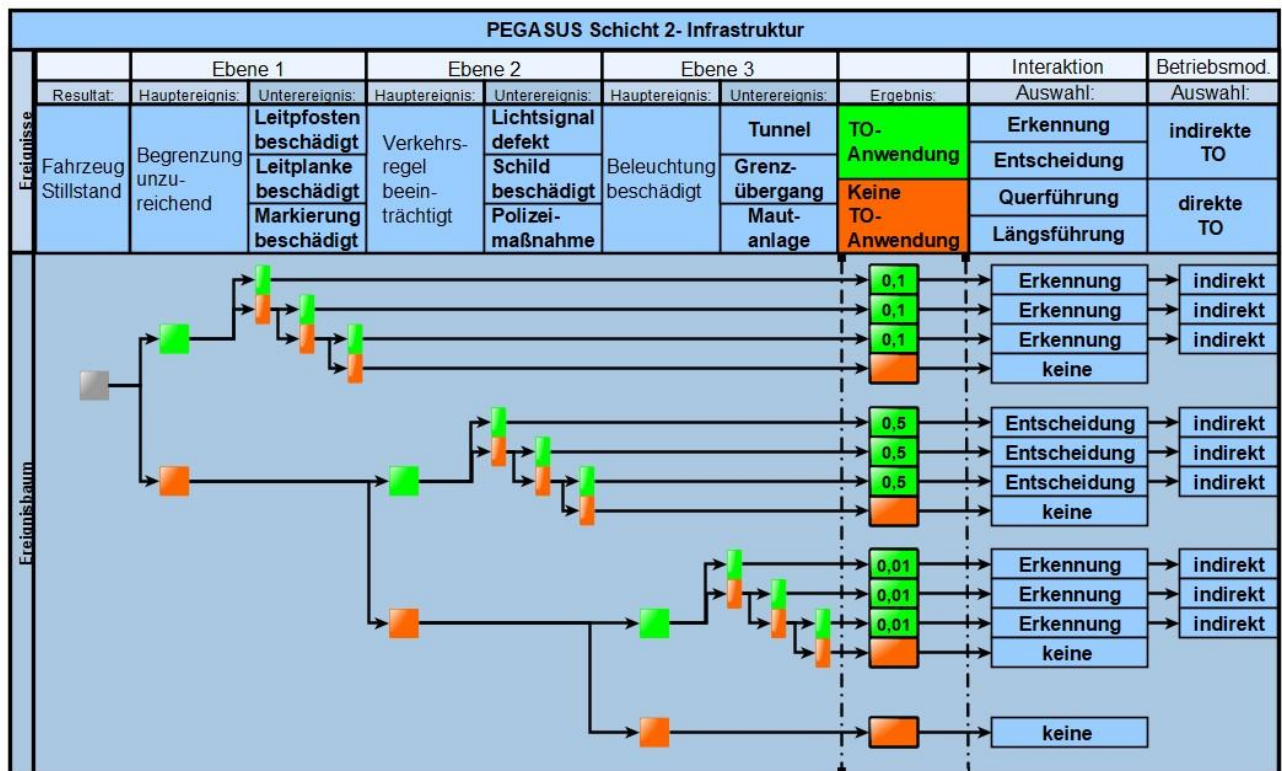


Abbildung 19 – Identifikation Infrastruktur – eigene Darstellung

In Abbildung 19 ist die Anwendung des Identifikationsschemas nach Schicht 2 – Infrastruktur dargestellt. Das Endereignis, als Resultat bezeichnet, ist der Fahrzeug Stillstand. Das System kann somit nicht eigenständig weiterfahren. Der Fahrzeug Stillstand ist der Ausgang der Betrachtung. Das erste Hauptereignis ist eine Beschädigung der Fahrbahnbegrenzung. Aus diesem Hauptereignis wurden drei Unterereignisse identifiziert. Leitpfosten, die Leitplanke, oder die Fahrbahnmarkierung ist beschädigt. Es besteht ein Bedarf die Fahrbahnbegrenzung für eine erfolgreiche Fahrzeugführung zu erkennen und zu bewerten. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Umfelderkennung. Das zweite Hauptereignis definiert eine Beeinträchtigung der Verkehrsregelung. Als Unterereignis wurden ein defektes Lichtsignal, ein beschädigtes Verkehrsschild und eine aktive Polizeimaßnahme festgelegt. Es folgt die Herausforderung die Verkehrsregelung zu erkennen und daraus eine Entscheidung über die Handlungsstrategie zu treffen. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Entscheidungsfindung. Das dritte Hauptereignis ist eine Beschädigung der Beleuchtungsanlagen. Innerhalb eines Tunnels, einer Mautanlage oder eines Grenzübergangs ist die Beleuchtung ausgefallen. Der Fahrweg und relevante Umgebungsmerkmale sollen erkannt werden. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Umfelderkennung. Im Kapitel [4.3 Ableitung der Anwendungsfälle](#) werden gewählte Beispiele in realer Abfolge erneut beschrieben und untersucht.

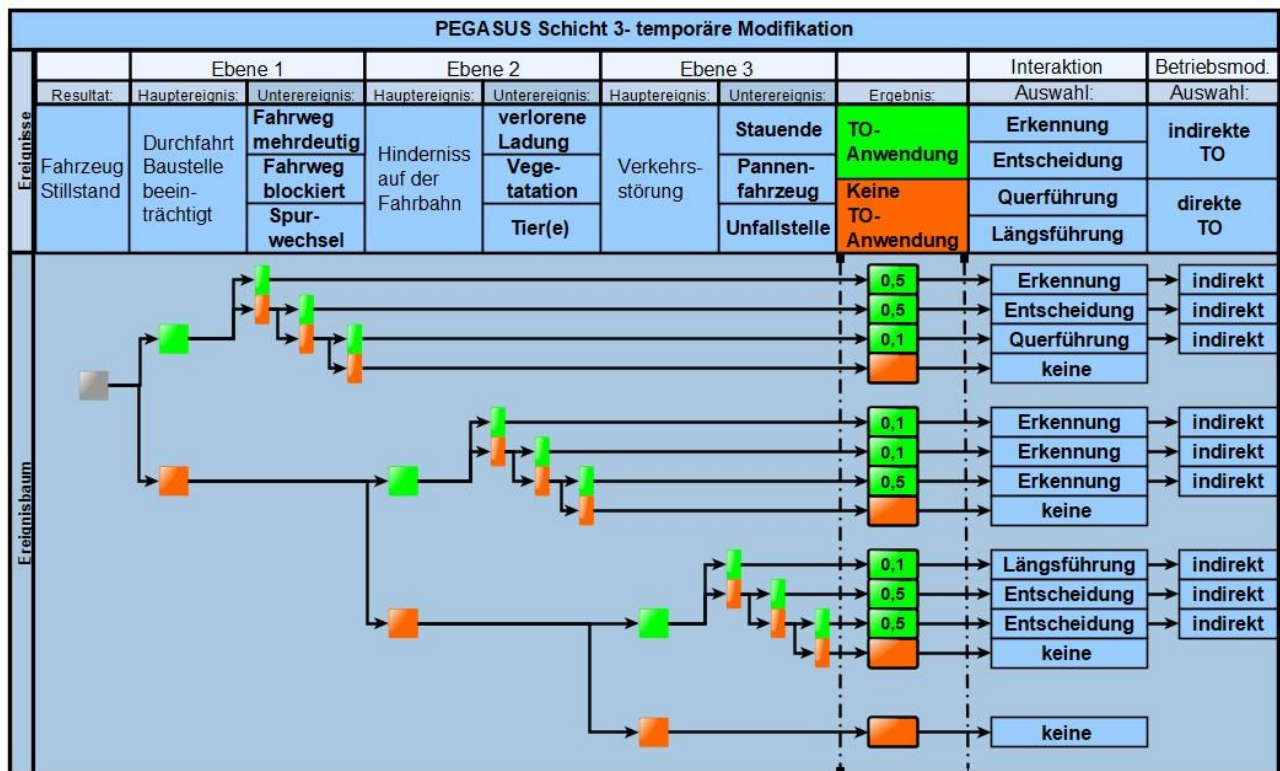


Abbildung 20 – Identifikation temporäre Modifikation – eigene Darstellung

In Abbildung 20 ist die Anwendung des Identifikationsschemas nach Schicht 3 – temporäre Modifikationen dargestellt. Das Endereignis, als Resultat bezeichnet, ist der Fahrzeug Stillstand. Das System kann somit nicht eigenständig weiterfahren. Der Fahrzeug Stillstand ist der Ausgang der Betrachtung. Das erste Hauptereignis ist die Durchfahrt in einer Baustelle. Aus diesem Hauptereignis wurden die drei Unterereignisse Fahrweg blockiert, Fahrweg mehrdeutig und Spurwechsel erforderlich identifiziert. Ist der Fahrweg mehrdeutig oder blockiert, soll eine Entscheidung über den folgenden Handlungsverlauf getroffen werden. Als Interaktion wird die Entscheidungsfindung festgelegt. Ist explizit ein Spurwechsel erforderlich, soll die Querführung übernommen werden. Als Interaktion wird die Querführung ausgewählt. Das zweite Hauptereignis definiert ein Hindernis auf der Fahrbahn. Auf der Fahrbahn befindet sich entweder verlorene Ladung, Vegetation der Natur, wie gefallene Äste, oder ein lebloses Tier. Es folgt die Herausforderung eine Entscheidung über den geeigneten Fahrweg zu treffen. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Entscheidungsfindung. Das dritte Hauptereignis ist eine Verkehrsstörung. Ein Stauende, ein Pannenfahrzeug, oder eine Unfallstelle beeinträchtigt den Fahrweg. Es soll über die weitere Vorgehensweise in Form einer Handlungsstrategie entschieden werden. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Entscheidungsfindung. Im Kapitel [4.3 Ableitung der Anwendungsfälle](#) werden gewählte Beispiele in realer Abfolge erneut beschrieben und untersucht.

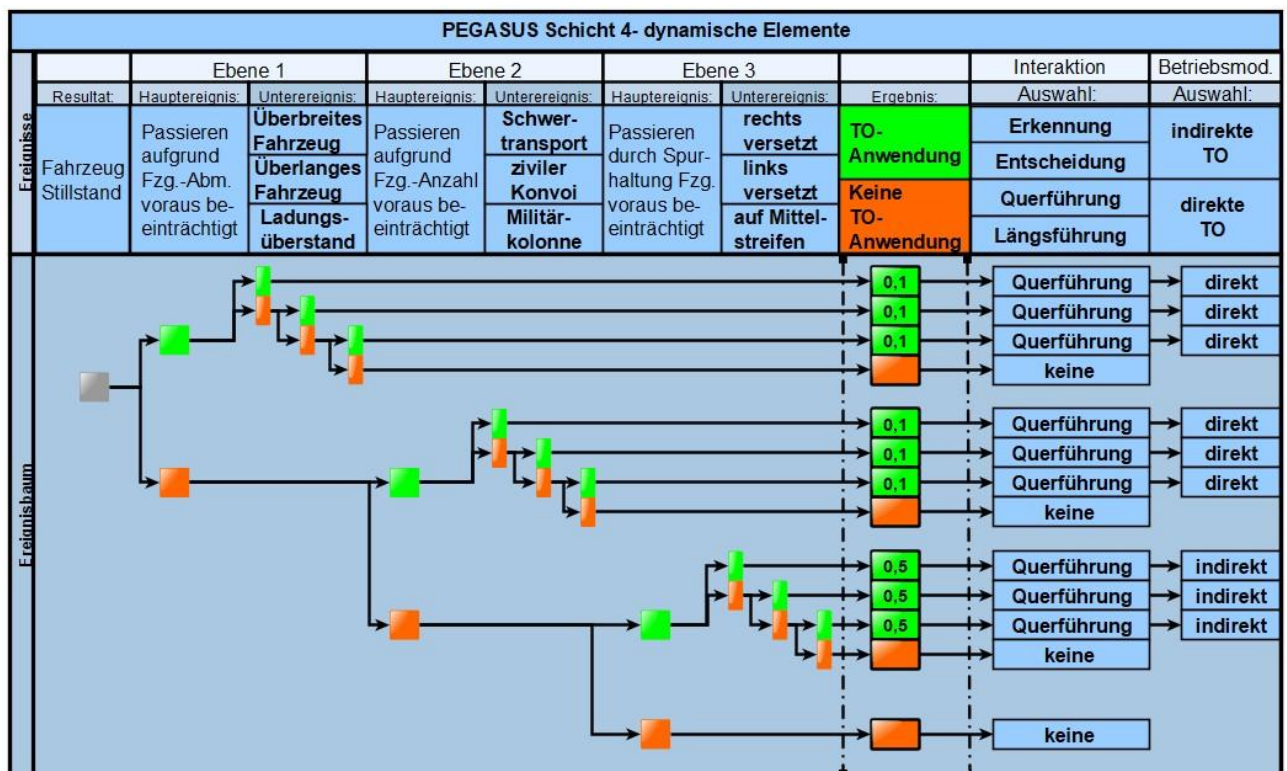


Abbildung 21 – Identifikation dynamische Elemente – eigene Darstellung

In Abbildung 21 ist die Anwendung des Identifikationsschemas nach Schicht 4 – dynamische Elemente dargestellt. Das Endereignis, als Resultat bezeichnet, ist der Fahrzeug Stillstand. Das System kann somit nicht eigenständig weiterfahren. Der Fahrzeug Stillstand ist der Ausgang der Betrachtung. Im ersten Hauptereignis ist das Passieren eines Fahrzeuges aufgrund seiner Abmessungen beeinträchtigt. Es wird in den Unterereignissen zwischen einem Fahrzeug mit Überbreite, Überlänge und einem Ladungsüberstand unterschieden. Aufgrund der Beeinträchtigung ist der Überholvorgang nicht möglich und muss durch einen Teleoperator aktiv übernommen werden. Als notwendige Interaktion wird die Übernahme der Querführung festgelegt. Im zweiten Hauptereignis ist das Passieren von Fahrzeugen aufgrund der Anzahl beeinträchtigt. Es wird in den Unterereignissen zwischen einem Schwerlasttransport inklusive Begleitfahrzeuge, einem zivilen Konvoi und einer Kolonne des Militärs unterschieden. Der Überholvorgang ist nicht möglich und soll aktiv übernommen werden. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Übernahme der Querführung. Im dritten Hauptereignis ist das Passieren eines Fahrzeugs aufgrund seiner Spurhaltung beeinträchtigt. Der Überholvorgang soll aktiv übernommen werden. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Übernahme der Querführung. Im Kapitel [4.3 Ableitung der Anwendungsfälle](#) werden gewählte Beispiele in realer Abfolge erneut beschrieben und untersucht.

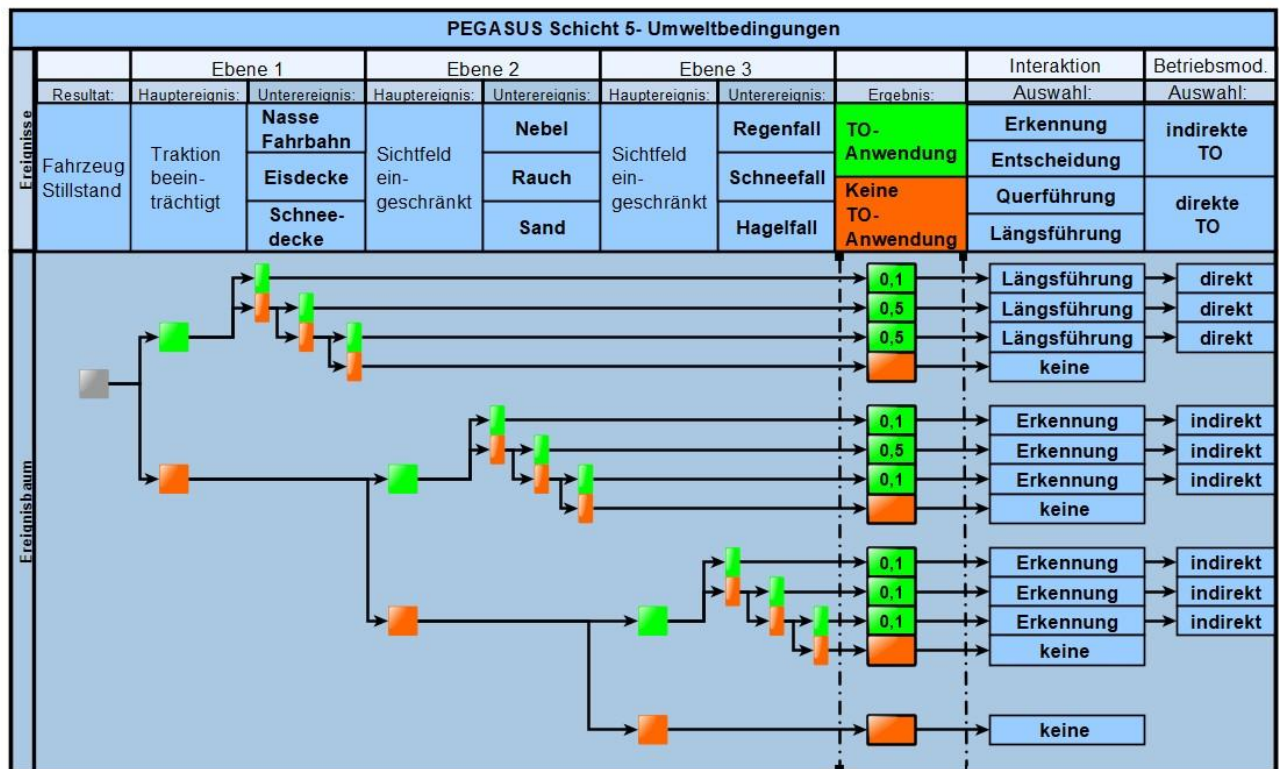


Abbildung 22 – Identifikation Umweltbedingungen – eigene Darstellung

In Abbildung 22 ist die Anwendung des Identifikationsschemas nach Schicht 5 – Umweltbedingungen dargestellt. Das Endereignis, als Resultat bezeichnet, ist der Fahrzeug Stillstand. Das System kann somit nicht eigenständig weiterfahren. Der Fahrzeug Stillstand ist der Ausgang der Betrachtung. Im ersten Hauptereignis ist die Traktion beeinträchtigt. Es wird in den Untereignissen zwischen einer nassen Fahrbahn, einer Eisdecke und einer Schneedecke unterschieden. Aufgrund der Beeinträchtigung soll die Längsführung aktiv teleoperativ übernommen werden. Als notwendige Interaktion wird in allen Ereignissen die Übernahme der Längsführung festgelegt. Im zweiten Hauptereignis ist das Sichtfeld in Fahrtrichtung eingeschränkt. Es wird in den Untereignissen zwischen einem anhaltenden Nebel, einer Rauchentwicklung und einem Sandsturm unterschieden. Die Umgebung kann in Folge aller drei Untereignisse nicht ausreichend wahrgenommen werden. Ein Teleoperator soll die Verantwortung über die Umfelderkennung übernehmen, um die Weiterfahrt zu gewährleisten. Die gewählte Interaktion ist in allen Ereignissen die Übernahme der Umfelderkennung. Nach dem dritten Hauptereignis ist das Sichtfeld, analog zum zweiten Hauptereignis, erneut eingeschränkt. Die Beeinträchtigung erfolgt durch Regenfall, Schneefall, oder Hagel. In allen Ereignissen ist die Übernahme der Umfelderkennung gefordert. Im Kapitel [4.3 Ableitung der Anwendungsfälle](#) werden gewählte Beispiele in realer Abfolge erneut beschrieben und untersucht.

Entscheidungsfindung. Im Kapitel [4.3 Ableitung der Anwendungsfälle](#) werden gewählte Beispiele in realer Abfolge erneut beschrieben und untersucht.

Innerhalb dieses Kapitels sollte die Anwendung des Identifikationsschemas verdeutlicht werden. Die Unterereignisse wurden deshalb gruppiert beschrieben. Im folgenden Kapitel werden pro Schicht zwei Anwendungsfälle einzeln beispielhaft in realer Abfolge abgeleitet und erklärt. Innerhalb dieser Ableitung werden alle Bestandteile des Anwendungsfalls aufgeführt. Dazu gehört beispielsweise eine Annahme mit welcher Wahrscheinlichkeit der Anwendungsfall auftritt. Alle identifizierten Anwendungsfälle werden im Anhang in einer Tabelle eingeordnet. Die abgeleiteten Anwendungsfälle werden im weiteren Verlauf auch jeweils einzeln bewertet.

4.3 Ableitung der teleoperativen Anwendungsfälle und Szenarien

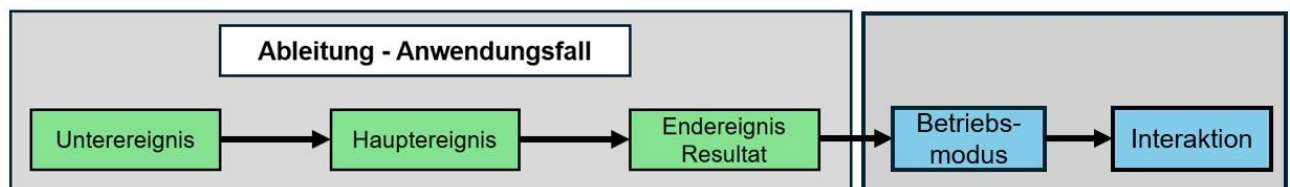


Abbildung 24 – Ableitungskette Anwendungsfall – eigene Darstellung

In Abbildung 24 ist die Kausalkette des realen Anwendungsfalls dargestellt. Das Unterereignis führt demnach zu einem Hauptereignis. Das Hauptereignis führt zu einem Endereignis. Das Endereignis ist in allen Beispielen der Stillstand des Fahrzeugs. An diesem Punkt ist somit ein teleoperativer Eingriff notwendig, da das automatisierte System nicht mehr eigenständig weiterfahren kann. Im nächsten Schritt wird der Betriebsmodus aktiviert und eine Interaktion durchgeführt, welche die Fahraufgabe lösen soll. Alle Elemente des Anwendungsfalls sind aus der Identifikation bekannt. Die Ableitung ordnet die einzelnen Bestandteile in die reale Abfolge. Im folgenden Schritt werden pro Schicht nach PEGASUS zwei Szenarien abgeleitet und erklärt.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Fahrbahnoberfläche unzureichend	Riss(e)	Fahrbahngeometrie unzureichend	Fahrbahnbreite	Fahrbahnoberfläche bedeckt	Reifenspuren	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Löcher		Kurvenradius		Schnee	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	direkte TO
		Spurrinnen		Einfädellänge		verlorene Fracht		Querführung	
								Längsführung	

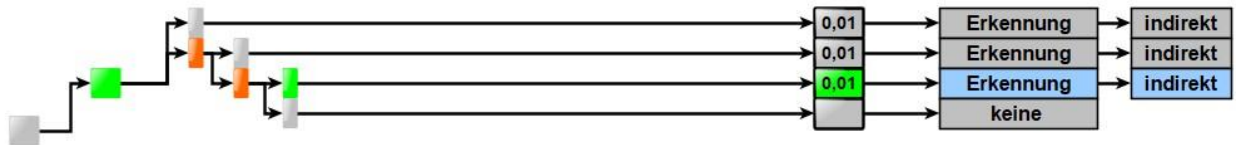


Abbildung 25 – Anwendungsfall 1 - Schicht 1 – eigene Darstellung

In Abbildung 25 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des ersten Anwendungsfalles der ersten Schicht dargestellt. Ausgeprägte Spurrinnen führen zu einer unzureichenden Fahrbahnoberfläche. Das Fahrzeug kann dieses Ereignis nicht eigenständig einordnen. Es werden Linienstrukturen erkannt, welche Fahrbahnmarkierungen sein könnten. Der Fahrweg ist nicht eindeutig erkennbar. Es kommt zum Stillstand. Es wird eine indirekte Teleoperation angefordert, um bei der Umfelderkennung einzugreifen. Der Operator wählt die tatsächlichen Begrenzungslinien aus und klassifiziert die Spurrinnen. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird als gering eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Fahrbahnoberfläche unzureichend	Riss(e)	Fahrbahngeometrie unzureichend	Fahrbahnbreite	Fahrbahnoberfläche bedeckt	Reifenspuren	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Löcher		Kurvenradius		Schnee	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	direkte TO
		Spurrinnen		Einfädellänge		verlorene Fracht		Querführung	
								Längsführung	

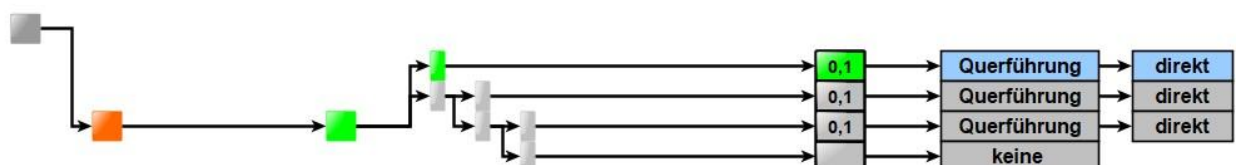


Abbildung 26 – Anwendungsfall 2 - Schicht 1 – eigene Darstellung

In Abbildung 26 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des zweiten Anwendungsfalles der ersten Schicht dargestellt. Die Einfädellänge auf eine Nebenspur ist zu kurz und führt zu einer unzureichenden Fahrbahngeometrie. Die verbleibende Restlänge ist zu gering, da keine geeignete Lücke in den fließenden Verkehr gefunden wurde. Das System müsste eigenständig auf den Standstreifen, oder aus dem Stillstand in den fließenden

Verkehr fahren. Das System kann die Einordnung in die Spur nicht eigenständig übernehmen und kommt zum Stillstand. Es wird eine direkte Teleoperation angefordert. Der Operator soll die komplette Querführung übernehmen, um eine erfolgreiche Einordnung zu gewährleisten. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird im mittleren Bereich eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Begrenzung unzureichend	Leitpfosten beschädigt	Verkehrsregel beeinträchtigt	Lichtsignal defekt	Beleuchtung beschädigt	Tunnel	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Leitplanke beschädigt		Schild beschädigt		Grenzübergang	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	direkte TO
		Markierung beschädigt		Polizei-maßnahme		Maut-anlage		Querführung	
								Längsführung	

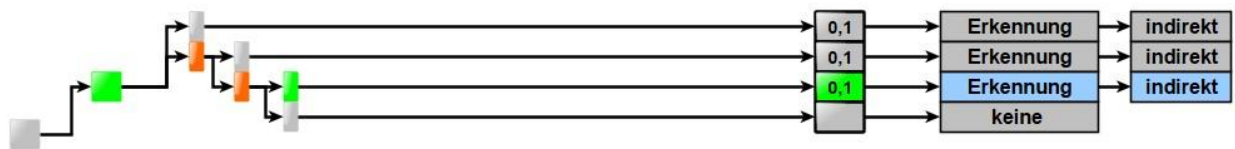


Abbildung 27 – Anwendungsfall 3 - Schicht 2 – eigene Darstellung

In Abbildung 27 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des ersten Anwendungsfalls der zweiten Schicht dargestellt. Eine beschädigte Markierungslinie führt zu einer unzureichenden Begrenzung. Das System kann den Fahrstreifenverlauf nicht eigenständig bestimmen. Der Teleoperator soll den korrekten Fahrstreifenverlauf identifizieren und bestätigen. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird im mittleren Bereich eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Begrenzung unzureichend	Leitpfosten beschädigt	Verkehrsregel beeinträchtigt	Lichtsignal defekt	Beleuchtung beschädigt	Tunnel	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Leitplanke beschädigt		Schild beschädigt		Grenzübergang	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	direkte TO
		Markierung beschädigt		Polizei-maßnahme		Maut-anlage		Querführung	
								Längsführung	

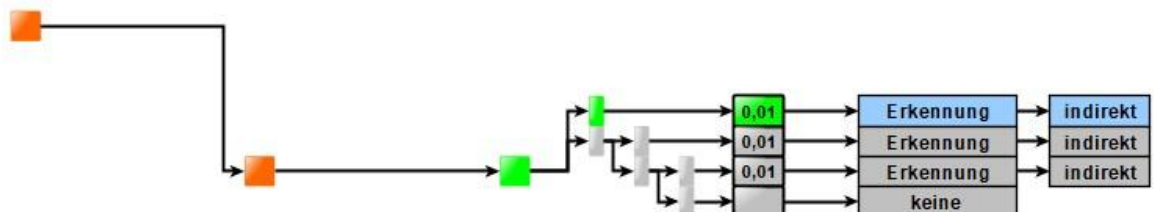


Abbildung 28 – Anwendungsfall 4 - Schicht 2 – eigene Darstellung

In Abbildung 28 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des zweiten Anwendungsfalls der zweiten Schicht dargestellt. Das Fahrzeug befindet sich in einem Tunnel, in dem die Beleuchtung beschädigt ist. Durch den Ausfall der Beleuchtung kann das System Umgebungsmerkmale nicht mehr zuverlässig erkennen. Der Operator soll relevante Objekte identifizieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird niedrig eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Durchfahrt Baustelle beeinträchtigt	Fahrweg mehrdeutig	Hinderniss auf der Fahrbahn	verlorene Ladung	Verkehrsstörung	Stauende	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Fahrweg blockiert		Vegetation		Pannenfahrzeug	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	
		Spurwechsel		Tier(e)		Unfallstelle		Querführung	direkte TO
								Längsführung	

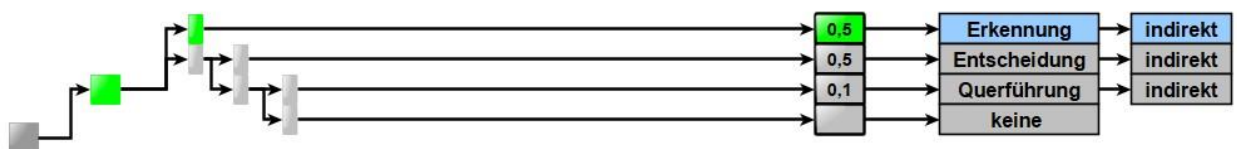


Abbildung 29 – Anwendungsfall 5 - Schicht 3 – eigene Darstellung

In Abbildung 29 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des ersten Anwendungsfalls der dritten Schicht dargestellt. Ein mehrdeutiger Fahrweg beeinträchtigt die Durchfahrt einer Baustelle. Das System kann den richtigen Fahrweg nicht erkennen. Der Operator soll den gültigen Fahrweg identifizieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird als hoch eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Durchfahrt Baustelle beeinträchtigt	Fahrweg mehrdeutig	Hinderniss auf der Fahrbahn	verlorene Ladung	Verkehrsstörung	Stauende	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Fahrweg blockiert		Vegetation		Pannenfahrzeug	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	
		Spurwechsel		Tier(e)		Unfallstelle		Querführung	direkte TO
								Längsführung	

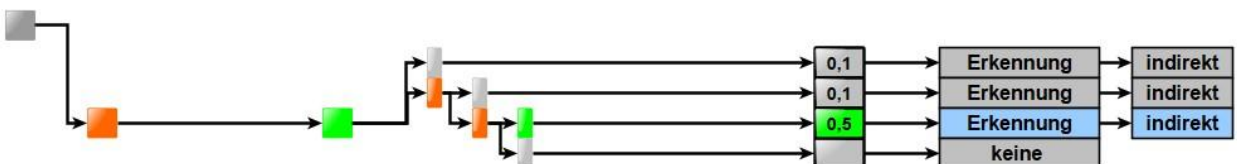


Abbildung 30 – Anwendungsfall 6 - Schicht 3 – eigene Darstellung

In Abbildung 30 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des ersten Anwendungsfalls der dritten Schicht dargestellt. Ein lebloses Tier stellt ein Hindernis auf der Fahrbahn dar. Das Hindernis kann vom System nicht klassifiziert werden. Der Operator soll das

Hindernis identifizieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird als hoch eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Passieren aufgrund Fzg.-Abm. voraus beeinträchtigt	Überbreites Fahrzeug	Passieren aufgrund Fzg.-Anzahl voraus beeinträchtigt	Schwertransport	Passieren durch Spurhaltung Fzg. voraus beeinträchtigt	Fzg. rechts versetzt	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Überlanges Fahrzeug		ziviler Konvoi		Fzg. links versetzt	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	
		Ladungsüberstand		Militärkolonne		Fzg. auf Mittelstreif.		Querführung	direkte TO
								Längsführung	

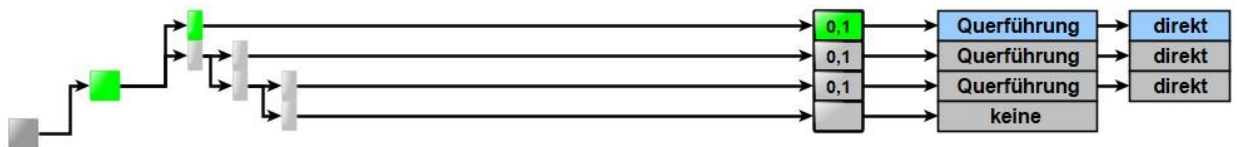


Abbildung 31 - Anwendungsfall 7 - Schicht 4 – eigene Darstellung

In Abbildung 31 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des ersten Anwendungsfalls der vierten Schicht dargestellt. Ein Fahrzeug mit Überbreite beeinträchtigt das Passieren. Aufgrund der Fahrzeugabmessungen kann das System den Überholvorgang nicht erfolgreich abschließen. Der Operator soll die Querführung aktiv übernehmen und das EGO- Fahrzeug am Hindernis vorbeiführen. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird im mittleren Bereich eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Passieren aufgrund Fzg.-Abm. voraus beeinträchtigt	Überbreites Fahrzeug	Passieren aufgrund Fzg.-Anzahl voraus beeinträchtigt	Schwertransport	Passieren durch Spurhaltung Fzg. voraus beeinträchtigt	Fzg. rechts versetzt	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Überlanges Fahrzeug		ziviler Konvoi		Fzg. links versetzt	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	
		Ladungsüberstand		Militärkolonne		Fzg. auf Mittelstreif.		Querführung	direkte TO
								Längsführung	

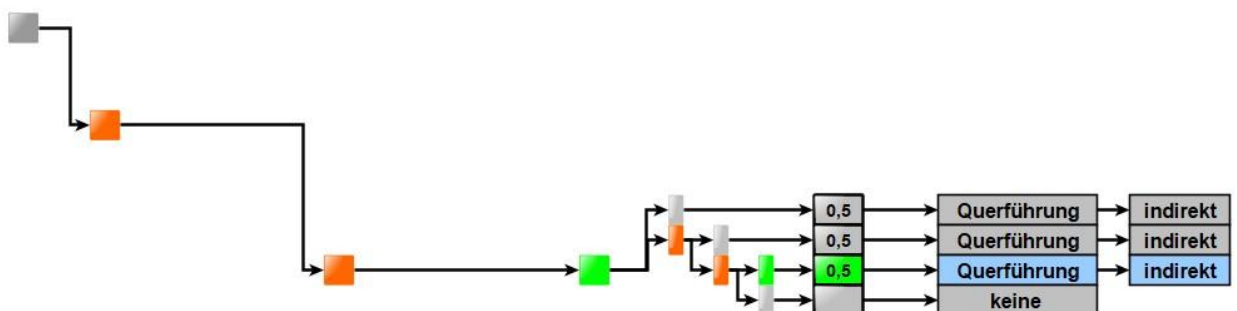


Abbildung 32 – Anwendungsfall 8 - Schicht 4 – eigene Darstellung

In Abbildung 32 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des zweiten Anwendungsfalls der vierten Schicht dargestellt. Ein Fahrzeug, welches sich zwischen zwei Spuren auf dem Mittelstreifen bewegt, beeinträchtigt das Passieren. Das System kann den Überholvorgang aufgrund der Fahrzeugposition nicht eigenständig durchführen. Der Operator

soll aktiv die Querführung übernehmen und den Überholvorgang durchführen. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird hoch eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Traktion beeinträchtigt	Nasse Fahrbahn	Sichtfeld eingeschränkt	Nebel	Sichtfeld eingeschränkt	Regenfall	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Eisdecke		Rauch		Schneefall	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	direkte TO
		Schneedecke		Sand		Hagelfall	Keine TO-Anwendung	Querführung	
								Längsführung	

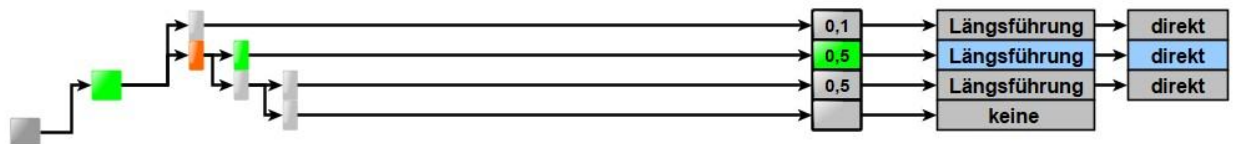


Abbildung 33 – Anwendungsfall 9 - Schicht 5 – eigene Darstellung

In Abbildung 33 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des ersten Anwendungsfalles der fünften Schicht dargestellt. Eine Eisdecke auf der Fahrbahn beeinträchtigt die Traktion. Das System kann die Geschwindigkeit nicht angemessen regeln. Der Operator soll die Längsführung aktiv übernehmen. Es wird eine indirekte Teleoperation angefordert. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird als hoch eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Traktion beeinträchtigt	Nasse Fahrbahn	Sichtfeld eingeschränkt	Nebel	Sichtfeld eingeschränkt	Regenfall	TO-Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Eisdecke		Rauch		Schneefall	Keine TO-Anwendung	Entscheidung	direkte TO
		Schneedecke		Sand		Hagelfall	Keine TO-Anwendung	Querführung	
								Längsführung	

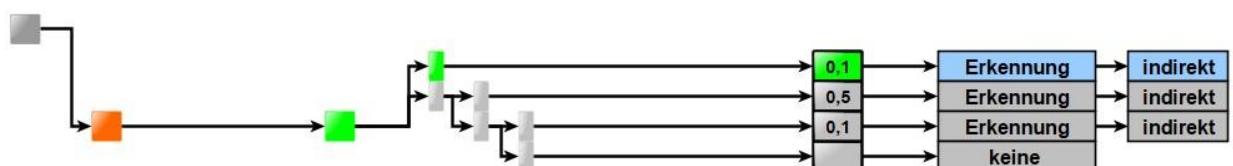


Abbildung 34 – Anwendungsfall 10 - Schicht 5 – eigene Darstellung

In Abbildung 34 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des zweiten Anwendungsfalles der fünften Schicht dargestellt. Anhaltender Nebel führt zu einer Einschränkung des optischen Sichtfelds. Das automatisierte System kann den Fahrweg nicht mehr ausreichend eigenständig erkennen. Der Operator soll fehlende Informationen über das Umfeld erkennen und ergänzen. Es wird eine indirekte Teleoperation angefordert. Die

Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird im mittleren Bereich eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Karten- daten fehlerhaft	Geometrie Abweichung	GNSS- Informat. fehlerhaft	Signal ausgefallen	Navigations- daten fehlerhaft	Route nicht verfügbar	TO- Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Fahrweg Abweichung		Signal gestört		Route fehlerhaft	Keine TO- Anwendung	Entscheidung	
		Geschw. Abweichung		Position ungenau				Querführung	direkte TO
								Längsführung	

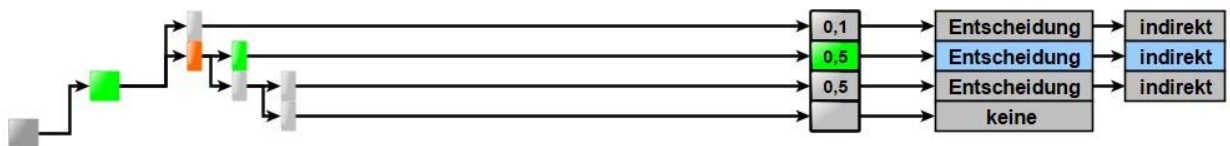


Abbildung 35 – Anwendungsfall 11 - Schicht 6 – eigene Darstellung

In Abbildung 35 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des zweiten Anwendungsfalls der sechsten Schicht dargestellt. Der vorhandene mögliche Fahrweg weicht von den systeminternen Kartendaten ab. Die Kartendaten sind fehlerhaft. Das automatisierte System kann die Fahrt nicht eigenständig weiterführen, da eine Entscheidung über die Wahl des Fahrwegs getroffen werden muss. Der Operator soll die Entscheidungsfindung übernehmen. Es wird eine indirekte Teleoperation angefordert. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird hoch eingestuft.

	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3			Interaktion	Betriebsmod.
Resultat:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Hauptereignis:	Untereignis:	Ergebnis:	Auswahl:	Auswahl:
Fahrzeug Stillstand	Karten- daten fehlerhaft	Geometrie Abweichung	GNSS- Informat. fehlerhaft	Signal ausgefallen	Navigations- daten fehlerhaft	Route nicht verfügbar	TO- Anwendung	Erkennung	indirekte TO
		Fahrweg Abweichung		Signal gestört		Route fehlerhaft	Keine TO- Anwendung	Entscheidung	
		Geschw. Abweichung		Position ungenau				Querführung	direkte TO
								Längsführung	

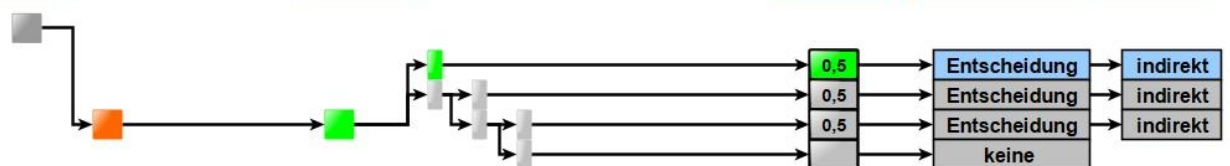


Abbildung 36 – Anwendungsfall 12 - Schicht 6 – eigene Darstellung

In Abbildung 36 ist der Pfad des Ereignisbaums für die Identifikation des zweiten Anwendungsfalls der sechsten Schicht dargestellt. Ein ausgefallenes GNSS- Signal erzeugt fehlerhafte Positionsinformationen. Aufgrund des Signalausfalls kann der Fahrzeugstandort nicht eigenständig durch das System bestimmt werden. Der Operator soll anhand von Umgebungsmerkmalen den Standort bestimmen. Es wird eine indirekte Teleoperation

angefordert. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis den vorliegenden Anwendungsfall auslöst, wird hoch eingestuft.

4.4 Allgemeine Plausibilisierung und Szenario-Bildung

Die Identifikation potenzieller TO-Anwendungsfälle erfolgt anhand von Beeinträchtigungen, die aus den Merkmalen der PEGASUS-Schichten resultieren. Die Methodik bewertet dabei bewusst nicht die Fähigkeiten eines konkreten automatisierten Fahrzeugs, sondern betrachtet ausschließlich die Ereignisse und Einflüsse der Verkehrsumgebung. In diesem Kapitel soll ein Prozess vorgestellt werden, der die Plausibilität der Anwendungsfälle prüft und Szenarien bildet. Es soll die Idee untersucht werden ein Szenario aus mindestens einem oder mehreren Anwendungsfällen zu bilden. Somit bildet entweder ein Anwendungsfall einer beliebigen Schicht das Szenario oder ein Anwendungsfall aus mehreren Schichten durch eine Kombination. Es darf pro Schicht demnach nur ein Anwendungsfall in das Szenario übertragen werden. Somit besteht ein Szenario aus maximal sechs Anwendungsfällen, wobei jeder Anwendungsfall zu einer eigenen der sechs Schichten gehört. Dies ist eine bewusst gewählte Begrenzung, um die Auswirkung der Kombinatorik einzugrenzen. In jeder Schicht können pro Identifikationsdurchlauf neun Anwendungsfälle übertragen werden. Davon wird in der Szenario-Bildung ein Fall übertragen. Bei eins- bis sechs Schichten, in denen ein Anwendungsfall auftreten kann, ergebe das $9^6 = 531441$ mögliche Kombinationen. Diese Kombinationen werden ohne Beachtung der zeitlichen Reihenfolge betrachtet.

Würde man nun alle möglichen Anwendungsfälle ableiten wären 54 Anwendungsfälle identifiziert. Kombiniert man schichtunabhängig zwei davon und beachtet dabei die Reihenfolge, ergeben das 2862 Kombinationen. Kombiniert man schichtunabhängig 6 Anwendungsfälle und beachtet die Reihenfolge resultieren 18,6 Milliarden Kombinationen.

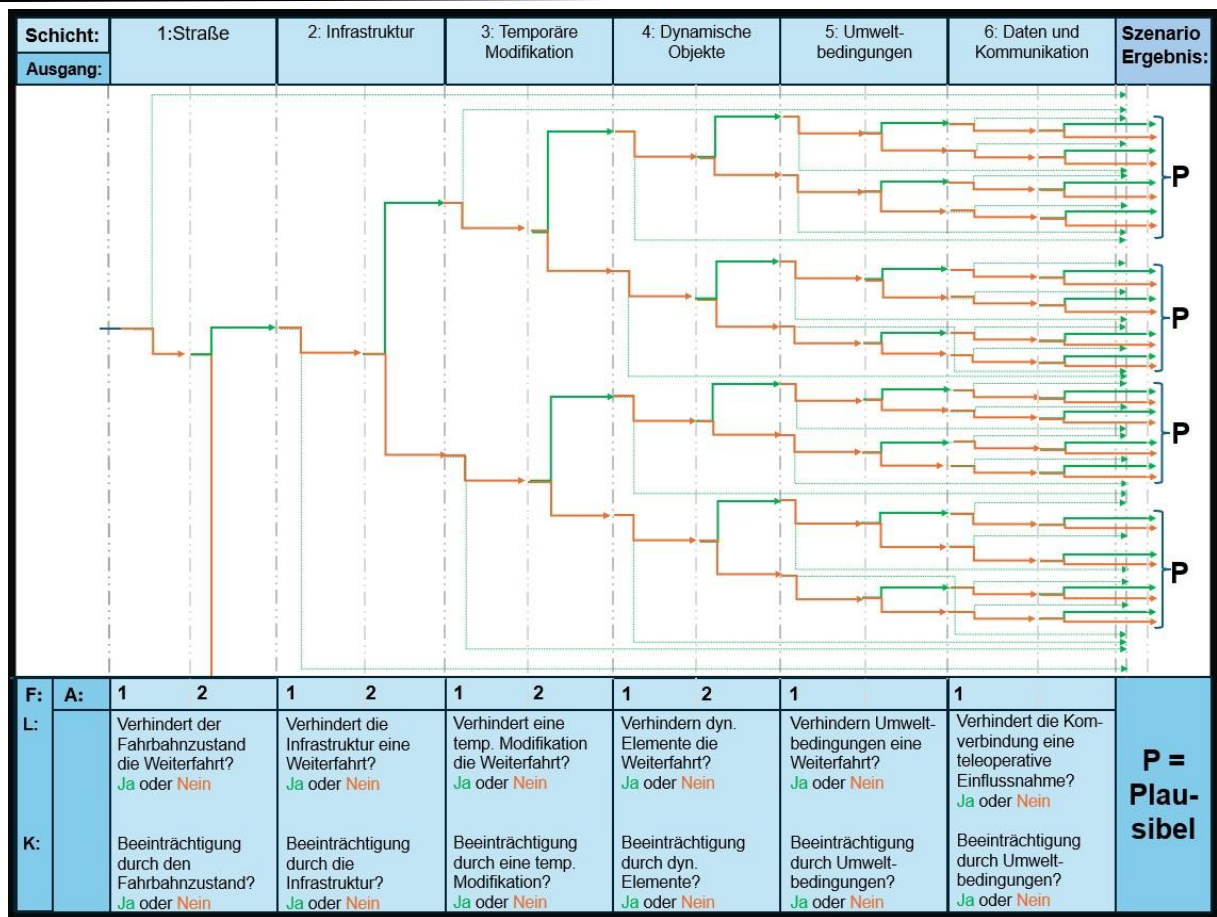


Abbildung 37 Szenariobildung – Plausibilitätsprüfung Teil 1 – eigene Darstellung

In Abbildung 37 ist ein Schema zur Bildung des Szenarios und der daraus resultierenden Kombinatorik dargestellt. Parallel wird das Szenario einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Es soll beantwortet werden, in welchen Schichten ein Bedarf und damit ein Anwendungsfall auftritt. Parallel soll geprüft werden, ob eine Schicht die Weiterfahrt grundsätzlich verhindert. In jeder Schicht werden zwei Fragen beantwortet. Wird eine Frage mit Ja beantwortet, bekommt der Pfad eine grüne Färbung. Wird die Frage mit nein beantwortet, bekommt der Pfad eine orange Färbung. Die Leitfrage wird mit dem Symbol L dargestellt und prüft, ob eine Weiterfahrt grundsätzlich möglich ist. Schließt die Schicht die Weiterfahrt aus, ist das Szenario nicht plausibel. Der Pfad endet und wird verblasst dargestellt. Schließt die Schicht die Weiterfahrt nicht aus, wird die Kontrollfrage betrachtet. Die Kontrollfrage wird mit K abgekürzt und prüft ob in der spezifischen Schicht ein Bedarf vorliegt. Ein Bedarf ist ein identifizierter Anwendungsfall. Tritt in keiner Schicht ein Anwendungsfall auf, ist das Szenario nicht plausibel. Wenn keine Schicht die Weiterfahrt ausschließt und mindestens ein Anwendungsfall vorhanden ist, ist das Szenario plausibel. Ein plausibles Szenario wird mit dem Buchstaben P bezeichnet.

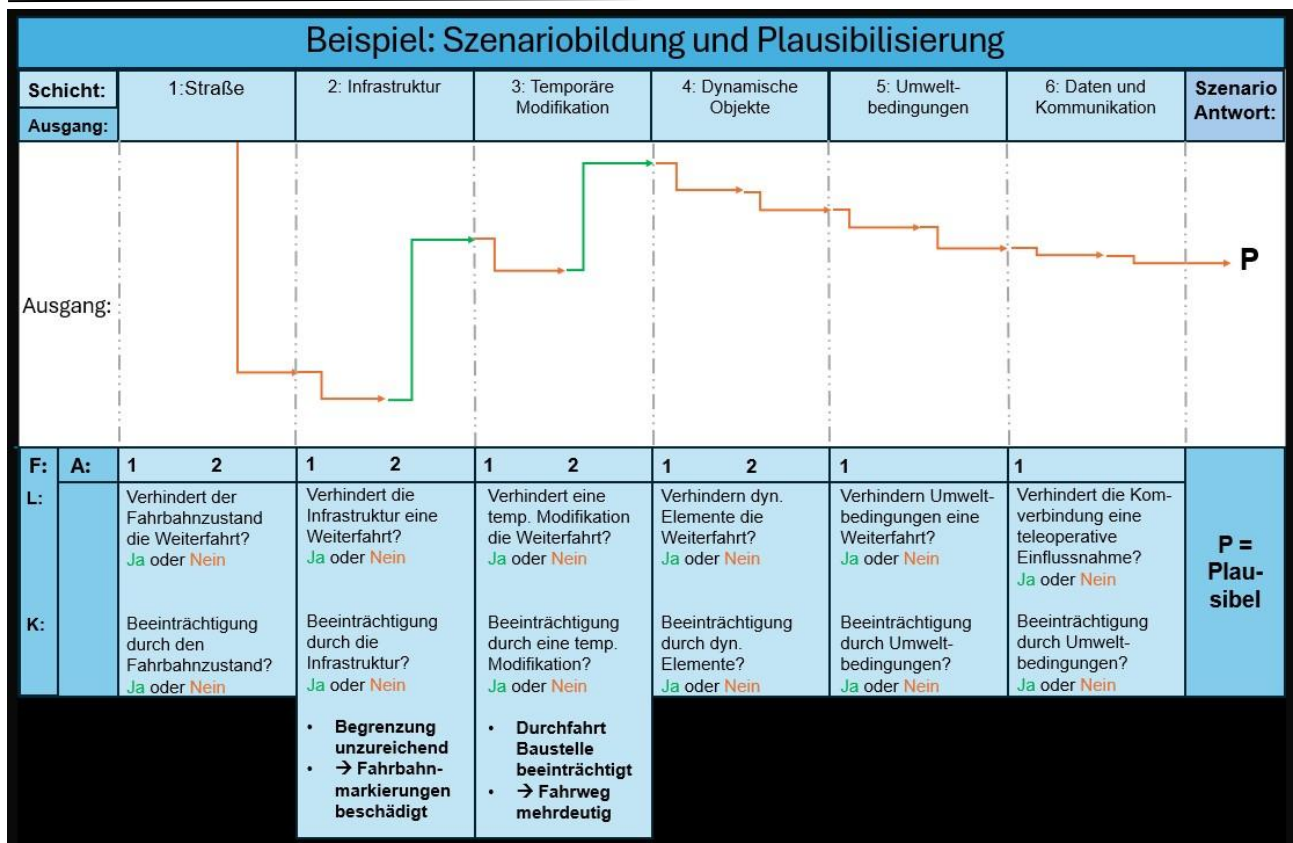


Abbildung 39 Szenariobildung und Plausibilisierung Beispiel – eigene Darstellung

In Abbildung 39 soll die Szenario-Bildung und Plausibilisierung beispielhaft erklärt werden. Der Fahrbahnzustand verhindert die Weiterfahrt nicht grundsätzlich. Es besteht keine Beeinträchtigung durch den Fahrbahnzustand. Die Infrastruktur verhindert eine Weiterfahrt nicht grundsätzlich. Es besteht jedoch eine Beeinträchtigung durch die Infrastruktur. Beschädigte Fahrbahnmarkierungen erzeugen eine unzureichende Begrenzung. Temporäre Modifikationen verhindern die Weiterfahrt nicht grundsätzlich. Der Fahrweg ist jedoch mehrdeutig und beeinträchtigt damit die Durchfahrt innerhalb einer Baustelle. Es gibt keine grundsätzliche Verhinderung, oder Beeinträchtigung der Weiterfahrt durch andere dynamische Elemente. Es gibt keine grundsätzliche Verhinderung, oder Beeinträchtigung der Weiterfahrt durch Umweltbedingungen. Es gibt keine grundsätzliche Verhinderung, oder Beeinträchtigung der Weiterfahrt durch digitale Informationen. Dieses Szenario wird demnach als plausibel eingestuft. Es gibt keinen Ausschluss der Weiterfahrt durch eine Schicht. Zudem werden zwei zuvor identifizierte Anwendungsfälle miteinander kombiniert. Es gibt demnach einen doppelten Teleoperationsbedarf. Welche Anwendungsfälle in welcher Anzahl miteinander kombiniert werden liegt in der Wahl des Anwenders. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Identifikation, Ableitung und Bewertung der Anwendungsfälle liegt werden keine weiteren

Kombinationen untersucht. Insbesondere die Möglichkeiten, welche aus der Detaillierung einer Plausibilisierung entstehen, sollen in der folgenden Diskussion untersucht werden.

4.5 Bewertungsansatz mittels Risikograph

In diesem Kapitel wird der Bewertungsansatz in Form eines Risikographen beschrieben und demonstriert. Es soll zuerst der allgemeine Aufbau und danach ein angewandter Graph für jeweils zwei abgeleitete Anwendungsfälle jeder Schicht vorgestellt werden. Der vorliegende Anwendungsfall wird als Startpunkt betrachtet. Drei Kategorien haben Einfluss auf den Wert des Risikographen. Es wird zwischen der Beherrschbarkeit, dem Schadensausmaß und der Wahrscheinlichkeit des Teleoperationsbedarfs unterschieden. Es wurden bewusst eigene Kategorien gewählt und definiert. Sie werden nach dem Vorbild der ISO26262 für die Teleoperation abgewandelt und abgeleitet. Es sollen eigene Kategorien zur Bewertung verwendet werden, um nicht den Eindruck zu erwecken die ASIL-Einstufung nach der ISO26262 anzuwenden.

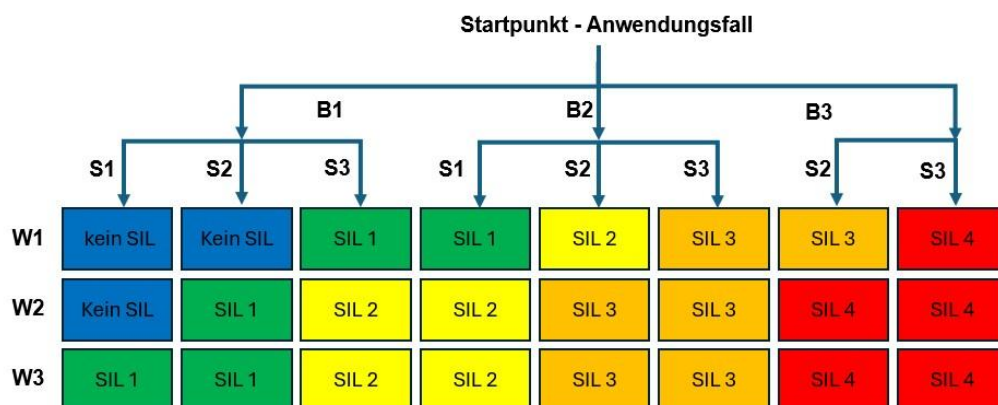


Abbildung 40 – Risikograph - allgemein – eigene Darstellung

In der Abbildung 40 wird der Grundaufbau des allgemeinen Risikographen unabhängig vom Anwendungsfall dargestellt. Felder in blauer Färbung werden in ihrem Risiko als vernachlässigbar eingestuft. Sie bekommen den Wert kein SIL. Felder in grüner Farbe werden SIL 1 zugeordnet. Felder in gelber Farbe werden SIL 2 zugeordnet. Felder in oranger Farbe werden SIL 3 und Felder in roter Farbe SIL 4 zugeordnet. Zuerst wird der Wahrscheinlichkeitswert betrachtet. Es kann eine vertikale Zuordnung getroffen werden. Danach werden Beherrschbarkeit und der Schweregrad betrachtet, welche die horizontale Zuordnung festlegen.

Wahrscheinlichkeit des Teleoperationsbedarfs:

Die Wahrscheinlichkeit des Teleoperationsbedarfs soll analog der Expositionswahrscheinlichkeit nach der ISO26262 definiert werden. Die Expositionswahrscheinlichkeit wird auf Grundlage einer Begründung für jedes Ereignis qualitativ angenommen. Sie beschreibt die Häufigkeit in Bezug auf das Befinden eines Systems in einer Betriebssituation. In dieser Situation führt ein Fehlverhalten zu einer Gefährdung (ISO26262-1, 2018 S. 1). Die Wahrscheinlichkeit des Teleoperationsbedarfs legt nicht die Wahrscheinlichkeit fest, mit der der Anwendungsfall auftritt. Sie legt die Wahrscheinlichkeit fest, mit der die Teleoperation beim vorliegenden Anwendungsfall real notwendig wird. Ist ein Anwendungsfall identifiziert und abgeleitet könnte beispielsweise bei jedem zweiten Auftreten des Anwendungsfalles eine Teleoperation notwendig sein. Es könnte aber auch nur einmal aus einhundert Fällen die Teleoperation real angefordert werden. Je höher die Anzahl der Anwendungsfälle, die real eine Teleoperation notwendig werden lassen, desto höher ist die Häufigkeit sicherheitskritischer Eingriffe. Es steigt die Wahrscheinlichkeit, dass im Betrieb technische oder menschliche Fehler in Zusammenhang mit der Teleoperation auftreten. Die Auftretenswahrscheinlichkeit wird im Identifikationsprozess festgelegt und in die Bewertung übertragen. Es bildet sich ein methodischer Zusammenhang aus Identifikation und Bewertung. Innerhalb dieser Arbeit ist dies ein festgelegter Wert, der auf einer Annahme beruht. Es wurde keine wissenschaftlichen Daten einbezogen. Der genaue, reale Wert ist somit vorerst zweitrangig. Es soll vermittelt werden, wie die Wahrscheinlichkeit in der Bewertung einfließt.

Es gibt drei Stufen der Auftretenswahrscheinlichkeit. Es wird zwischen einer geringen Wahrscheinlichkeit mit dem Wert 0,01, einer mittleren Wahrscheinlichkeit mit dem Wert 0,1 und einer hohen Wahrscheinlichkeit mit dem Wert 0,5 unterschieden.

Die geringe Wahrscheinlichkeit definiert somit einen Anwendungsfall, der in einem von einhundert Fällen eine Teleoperation bedarf.

Die mittlere Wahrscheinlichkeit definiert einen Anwendungsfall, der in einem von zehn Fällen eine Teleoperation bedarf.

Die hohe Wahrscheinlichkeit definiert einen Anwendungsfall, der in jedem zweiten Auftreten eine Teleoperation bedarf.

Beherrschbarkeit:

Die Beherrschbarkeit wird analog zur Kontrollierbarkeit nach der ISO26262 definiert. Die Kontrollierbarkeit ist die Fähigkeit eine spezifische Gefährdung oder einen Schaden zu verhindern. Ausschlaggebend sind die Reaktionen der involvierten Personen. Externe

Messdaten können den Prozess unterstützen (ISO26262-1, 2018 S. 6). Die Beherrschbarkeit soll einordnen, in welchem Maß der Anwendungsfall für einen Teleoperator erfolgreich durchführbar ist. Es wird in drei unterschiedlichen Stufen unterschieden. Dazu gehören eine gute, eine eingeschränkte und eine schlechte Beherrschbarkeit.

Eine gute Beherrschbarkeit wird durch keine äußeren Einflüsse nennenswert beeinträchtigt. Andere Verkehrsteilnehmer, Umweltbedingungen oder infrastrukturellen Gegebenheiten erzeugen lediglich eine geringe, oder keine Beeinträchtigung.

Eine eingeschränkte Beherrschbarkeit erzeugt eine erhöhte Belastung des Teleoperators. Es treten Beeinträchtigungen durch andere Verkehrsteilnehmer, Umweltbedingungen, oder infrastrukturelle Begebenheiten auf. Der Anwendungsfall ist beherrschbar, erfordert jedoch erhöhten Bedarf an Aufmerksamkeit und Konzentration.

Eine schwere Beherrschbarkeit beschreibt einen Anwendungsfall, der teleoperativ nur schwer erfolgreich gelöst werden kann. Eine, oder mehrere sehr starke Beeinträchtigungen durch andere Verkehrsteilnehmer, Umweltbedingungen, oder infrastrukturellen Gegebenheiten reduzieren die Beherrschbarkeit erheblich. Der Anwendungsfall erfordert maximale Aufmerksamkeit und Konzentration.

Schadensausmaß:

Das Schadensausmaß soll ebenso analog zur ISO26262 definiert werden. In der ISO26262 wird der Schweregrad definiert. Der Schweregrad wird als „Einschätzung des Ausmaßes des Schadens für eine oder mehrere Personen, der bei einem potenziell gefährlichen Ereignis auftreten kann“ (ISO26262-1, 2018 S. 24), definiert. Das Schadensausmaß in dieser Arbeit soll das Ausmaß des Schadens bei einer fehlerhaft durchgeführten Teleoperation beschreiben. Es wird in vier unterschiedlichen unsicheren Steuerungsaktionen parallel zur STPA-Methode unterschieden. Die STPA- Methodik wurde im Kapitel [3.2 Methoden der Szenario Generierung](#) vorgestellt. Im ersten Fall führt der Operator eine Aktion nicht aus, obwohl sie notwendig wäre. Der Operator bremst beispielsweise gar nicht und es kommt zur Kollision. Im zweiten Fall führt der Operator eine Aktion aus, obwohl sie nicht notwendig ist. Eine unnötige Bremsung könnte beispielsweise zu einem Auffahrunfall mit einem folgenden Fahrzeug führen. Im dritten Fall führt der Operator die notwendige Aktion aus. Die Ausführung erfolgt jedoch zu spät. Erfolgt eine Bremsung zu spät, kann es zur Kollision kommen. Im vierten Fall führt der Operator ebenfalls die richtige Aktion aus. Die Ausführung ist jedoch zu kurz oder zu lang. Wird zu kurz gebremst, kann es zur Kollision kommen. Wird zu lang gebremst, können die Räder beispielsweise blockieren und das Fahrzeug könnte aus der Fahrbahn ausbrechen. Zuerst sollen demnach in Abhängigkeit des Anwendungsfalls

mögliche unsichere Steuerungsaktionen abgeleitet und ihre Folgen im Ausmaß des Schadens bewertet werden. Das Schadensausmaß wird in drei unterschiedlichen Stufen eingeordnet. Es wird zwischen einem geringen, moderaten und einem hohen Schadensausmaß unterschieden. Ein Schaden entsteht in dieser Methodik, wenn das Fahrzeug mit einem statischen oder dynamischen Objekt kollidiert. Das Schadensausmaß S wird aus der Kollisionsart in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsbereichs gebildet.

Ein geringes Schadensausmaß beschreibt Schäden, die sich auf geringe bis mittlere Sachschäden beschränken. Es treten keine Personenschäden auf. Ein geringes Schadensausmaß entsteht lediglich bei geringen Geschwindigkeiten und resultiert aus einer Kollision mit einem statischen Element.

Ein mittleres Schadensausmaß beschreibt hohe Sachschäden in Verbindung mit leichten bis mittleren Personenschäden. Ein mittleres Schadensausmaß entsteht bei mittleren Geschwindigkeiten aus einer Kollision mit einem statischen Element. Zudem entsteht ein mittleres Schadensausmaß bei geringen Geschwindigkeiten aus einer Kollision mit einem dynamischen Element.

Ein hohes Schadensausmaß beschreibt sehr hohe Sachschäden in Verbindung mit schweren oder tödlichen Personenschäden. Ein hohes Schadensausmaß entsteht bei mittleren Geschwindigkeiten aus einer Kollision mit einem dynamischen Element. Parallel entsteht ein hohes Schadensausmaß aus einer Kollision mit einem statischen Element bei einer hohen Geschwindigkeit.

Eine geringe Geschwindigkeit wird mit einem Wert kleiner als 50 km/h festgelegt. Eine mittlere Geschwindigkeit wird mit einem Wert größer als 50 km/h und kleiner als 100 km/h festgelegt. Eine hohe Geschwindigkeit wird mit einem Wert größer als 100 km/h festgelegt. Auf der Autobahn ist mindestens mit einer mittleren Geschwindigkeit zu rechnen. Daher wird jedes Schadensausmaß der Beispielanwendung mindestens S2 betragen. Die Abbildungen zeigen den allgemeinen Risikographen und schließen S1 demnach nicht aus. In Abhängigkeit, ob die Kollision mit einem dynamischen Objekt annehmbar ist, kann demnach eindeutig zwischen S2 und S3 differenziert werden. Diese Annahme resultiert aus dem spezifischen Anwendungsfall. Falls eine Kollision mit einem dynamischen Objekt annehmbar ist, wird automatisch S3 zugeordnet, da minimal eine mittlere Geschwindigkeit angenommen wird. Kann eine Kollision mit einem dynamischen Objekt nicht angenommen werden, wird S2 zugeordnet.

Der Geschwindigkeitsbereich bezieht sich auf die Weiterfahrt, welche durch einen teleoperativen Eingriff unterstützt wurde, oder unterstützt wird. Aus der unterstützten Weiterfahrt

können Gefahren entstehen, die in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsbereichs das Schadensausmaß erzeugen.

Im weiteren Verlauf werden die abgeleiteten Anwendungsfälle in einem Risikographen bewertet. Es wird für jeden Anwendungsfall ein eigener Risikograph vorgestellt. Es wurden demnach pro Schicht zwei Risikographen entwickelt. Es resultiert eine Summe von 12 Risikographen.

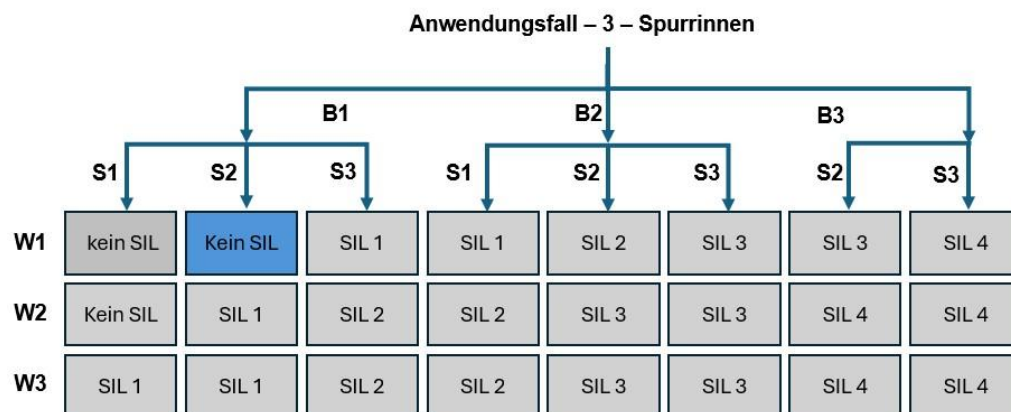


Abbildung 41 – Bewertung Anwendungsfall 3 – eigene Darstellung

In Abbildung 41 ist die Bewertung des dritten Anwendungsfalls anhand eines Risikographen dargestellt. Die Klassifizierung von Spurrinnen wird als gut beherrschbar eingestuft. Die teleoperative Aufgabe ist eindeutig. Es sind keine zusätzlichen erschwerenden Einflüsse zu erwarten. Es soll die Fahrbahnbegrenzung identifiziert werden. Hohe Geschwindigkeitsbegrenzungen und ein potenziell hohes Verkehrsaufkommen führen in jedem Fall zu einem erhöhten Risiko. Im Falle einer fehlerhaften Ausführung der Teleoperation wurde deshalb ein moderates Schadensausmaß festgelegt, da ein Personenschaden eine naheliegende Folge ist. Es wird zudem eher mit hohen Sachschäden gerechnet. Die Wahrscheinlichkeit, dass in diesem Anwendungsfall tatsächlich eine Teleoperation real notwendig ist, wird als gering eingestuft. Eine automatisierte Funktion kann die Fahraufgabe voraussichtlich überwiegend selbstständig bewältigen. Gemäß des entwickelten Risikographen wurde aus der Kombination der Kriterien die Einstufung kein SIL abgeleitet. Ein Risiko ist in diesem Anwendungsfall vorhanden, aber vernachlässigbar.

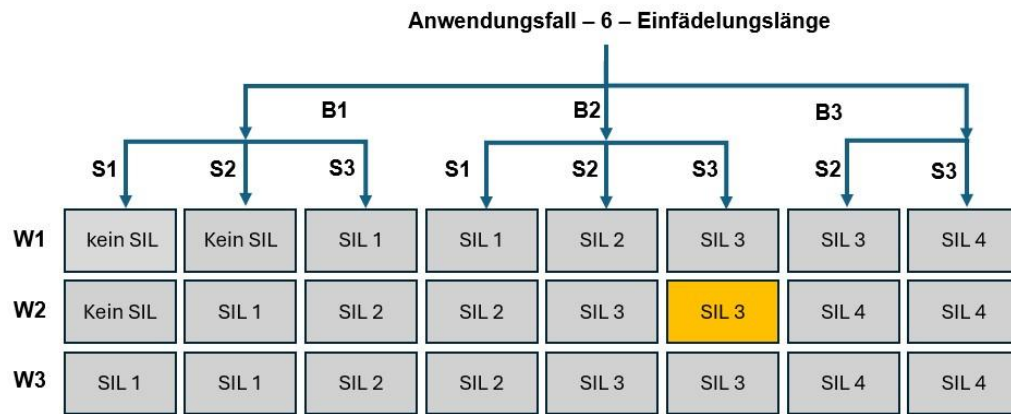


Abbildung 42 – Bewertung Anwendungsfall 6 – eigene Darstellung

In Abbildung 42 ist die Bewertung des sechsten Anwendungsfalls anhand eines Risikographen dargestellt. Die Einfädelung in eine benachbarte Spur wird als eingeschränkt beherrschbar eingestuft. Es ist anzunehmen, dass auf andere Verkehrsteilnehmer geachtet werden muss. Im schlimmsten Fall kann es zur Kollision mit anderen Fahrzeugen kommen. Daher wird ein hohes Schadensausmaß gewählt. Die Wahrscheinlichkeit, dass in diesem Anwendungsfall tatsächlich eine Teleoperation notwendig ist, wird im mittleren Bereich eingestuft. Eine zu kurze Einfädelungslänge kann die eigenständige Durchführung des Fahrmanövers durch das automatisierte System beeinträchtigen. Abhängig von anderen vorliegenden Verkehrsbedingungen kann die Einfädelung dennoch durch das automatisierte System bewältigt werden. Die Kombination dieser Kriterien führt zu einem Wert von SIL-3.

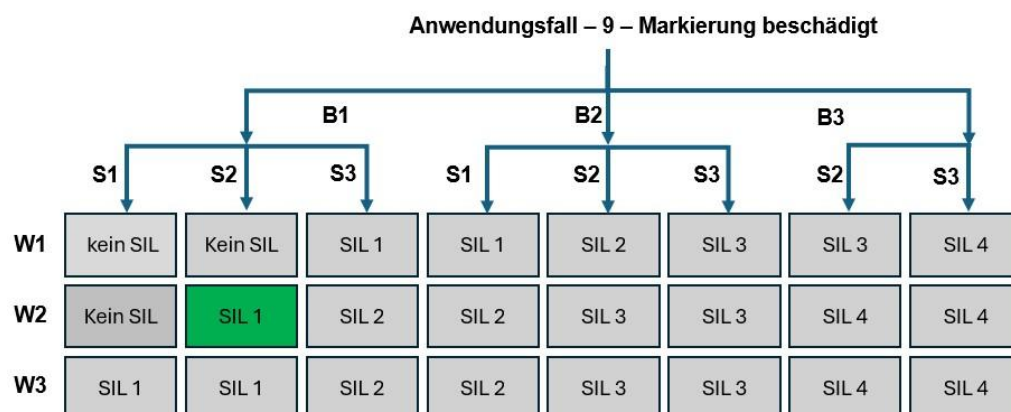


Abbildung 43 – Bewertung Anwendungsfall 9 – eigene Darstellung

In Abbildung 43 ist die Bewertung des neunten Anwendungsfalls anhand des entwickelten Risikographen dargestellt. Die Identifizierung des korrekten Fahrstreifenverlaufs wird als gut beherrschbar eingestuft. Es sind keine weiteren Einschränkungen zu erwarten. Das

Schadensausmaß wird im Betrachtungsraum mindestens als moderat eingestuft, da auf Autobahnen mit einem hohen Verkehrsaufkommen und mindestens mittleren Geschwindigkeiten zu rechnen ist. Je nach Ausmaß der Beschädigung der Begrenzungslinien können genügend Informationen für das automatisierte System vorhanden sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Anwendungsfall eine Teleoperation tatsächlich notwendig macht, wird deshalb im mittleren Bereich eingestuft. Die Kombination der Bewertungskriterien ergibt eine SIL-1 Einstufung.

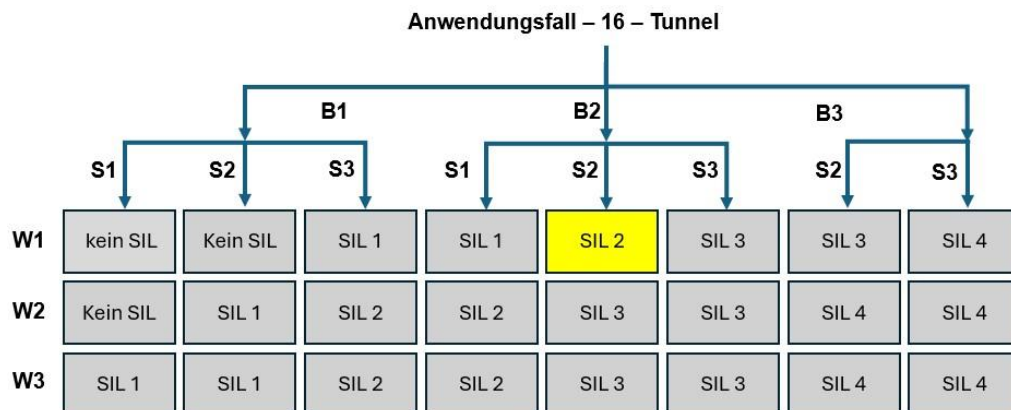


Abbildung 44 – Bewertung Anwendungsfall 16 – eigene Darstellung

In Abbildung 44 ist die Bewertung des Anwendungsfalls 16 anhand des entwickelten Risikographen dargestellt. Eine fehlerhafte Beleuchtung in einem Tunnel schränkt die Erkennung des Fahrweges ein und wird demnach als eingeschränkt beherrschbar eingeordnet. Es wird ein moderates Schadensausmaß bei einem fehlerhaften Verhalten angenommen. Die korrekte Erkennung des Fahrweges soll zur Spurhaltung beitragen. Die Wahrscheinlichkeit des Teleoperationsbedarfs wird als gering eingestuft, da die fahrzeugeigenen Beleuchtungsanlagen im Regelfall genug Licht zur Verfügung stellen. Die Bewertung resultiert anhand der vorliegenden Kriterien in einer SIL-2 Einstufung.

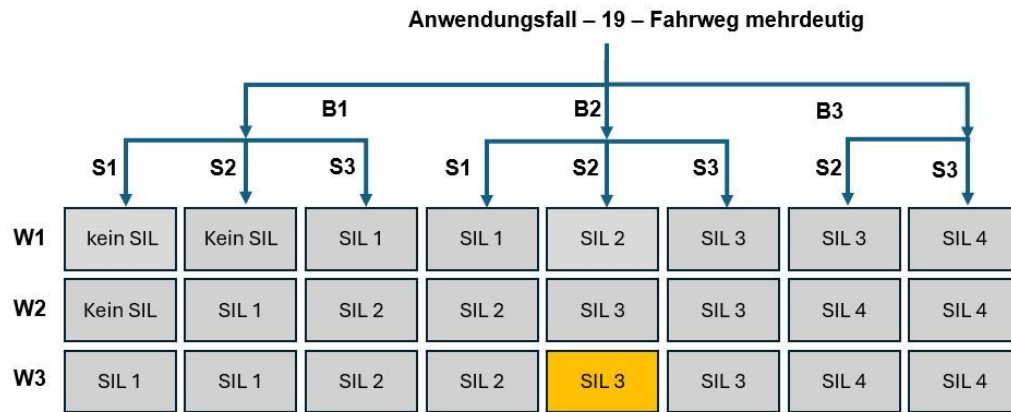


Abbildung 45 – Bewertung Anwendungsfall 19 – eigene Darstellung

In Abbildung 45 ist die Bewertung des Anwendungsfalls 19 anhand des Risikographen dargestellt. Ein mehrdeutiger Fahrweg innerhalb einer Baustelle wird als Einschränkung in der Beherrschbarkeit eingeordnet. Reduzierte Fahrbahnbreiten und Kurvenradien, sowie daraus resultierende verringerte Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern untermauern die Einstufung einer eingeschränkten Beherrschbarkeit. Verringerte Geschwindigkeiten in Baustellenabschnitten begrenzen das Schadensausmaß bei einem fehlerhaften teleoperativen Eingriff auf ein moderates Schadensausmaß. Die Notwendigkeit einer eindeutigen Festlegung des Fahrwegs bewirkt eine hohe Wahrscheinlichkeit eines teleoperativen Bedarfs. Aus den gegebenen Kriterien wurde ein SIL-3 Wert bestimmt.

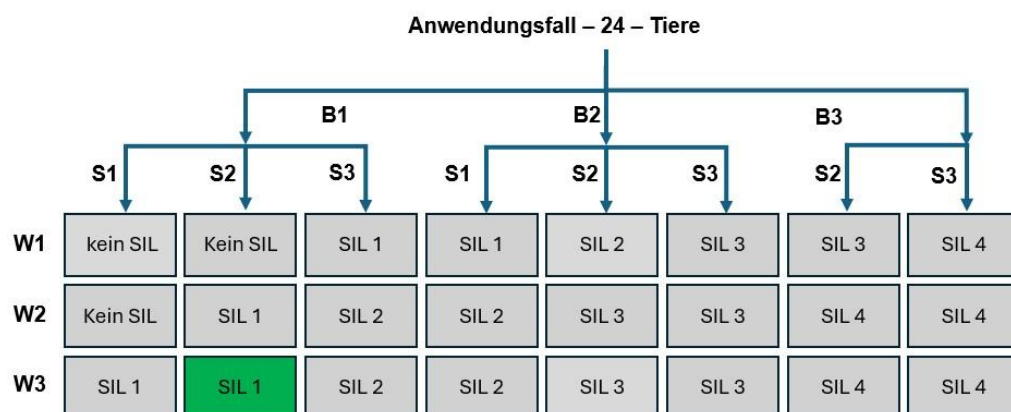


Abbildung 46 – Bewertung Anwendungsfall 24 – eigene Darstellung

In Abbildung 46 ist die Bewertung des Anwendungsfalls 24 anhand des entwickelten Risikographen dargestellt. Ein lebloses Tier soll als Hindernis klassifiziert werden. Es besteht keine weitere Einschränkung. Die Anwendungsfall wird als gut beherrschbar eingestuft. Eine falsche Klassifizierung könnte die Entscheidung über den weiteren Fahrverlauf

beeinflussen. Für ein größeres Tier in Fahrbahnmitte könnte in Folge ein Ausweichmanöver erforderlich sein. Für ein kleines Tier und die Position am Fahrbahnrand muss in Folge der Klassifizierung kein Spurwechsel erforderlich sein. Eine fehlerhafte Planung des Fahrweges könnte zu gefährlichen Situationen mit Personen und Sachschäden führen. Man kann jedoch nicht grundsätzlich von einem hohen Schadensausmaß ausgehen. Es wird ein moderates Schadensausmaß festgelegt. Da ein Tier in seiner Größe und geometrischen Beschaffenheit erschwert als Hindernis einzuschätzen ist, wird eine hohe Wahrscheinlichkeit des Teleoperationsbedarfs festgelegt. Aus den Kriterien ergibt sich eine SIL-1 Klassifizierung.

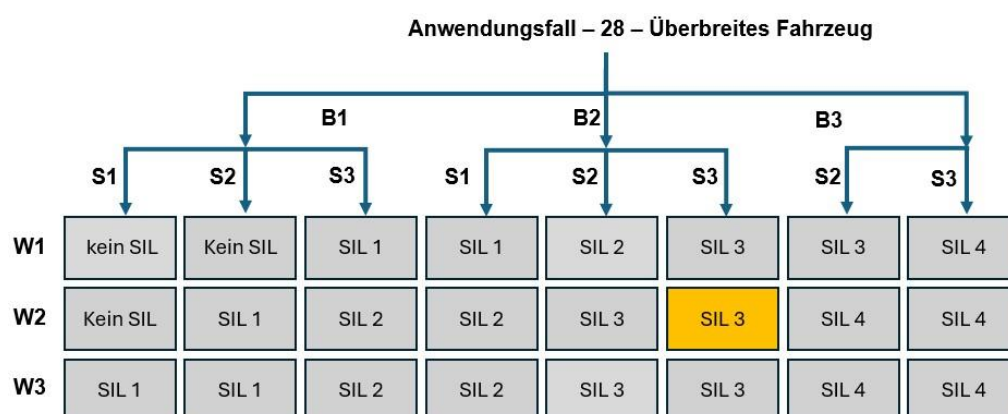


Abbildung 47 – Bewertung Anwendungsfall 28 – eigene Darstellung

In Abbildung 47 wird die Bewertung des Anwendungsfalls 28 mittels des Risikographen abgebildet. Ein Überbreites Fahrzeug beeinträchtigt das Überholmanöver. Aus der verringerten Fahrbahnbreite resultiert eine eingeschränkte Beherrschbarkeit. Im Fall einer fehlerhaften Ausführung des teleoperativen Eingriffs, ist eine Kollision zweier dynamischer Elemente zu erwarten. Es wird von einem maximalen Personen- und Sachschaden gerechnet und deshalb die Einstufung eines hohen Schadensausmaßes festgelegt. Abhängig von der Fahrbahnbreite, dem Abstand und dem Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer könnte das automatisierte System das Manöver durchaus selbst durchführen. Die Wahrscheinlichkeit, dass in diesem Anwendungsfall eine Teleoperation angefordert wird, wurde im mittleren Bereich eingestuft. Es resultiert ein SIL-3 Wert aus der Kombination der Bewertungskriterien.

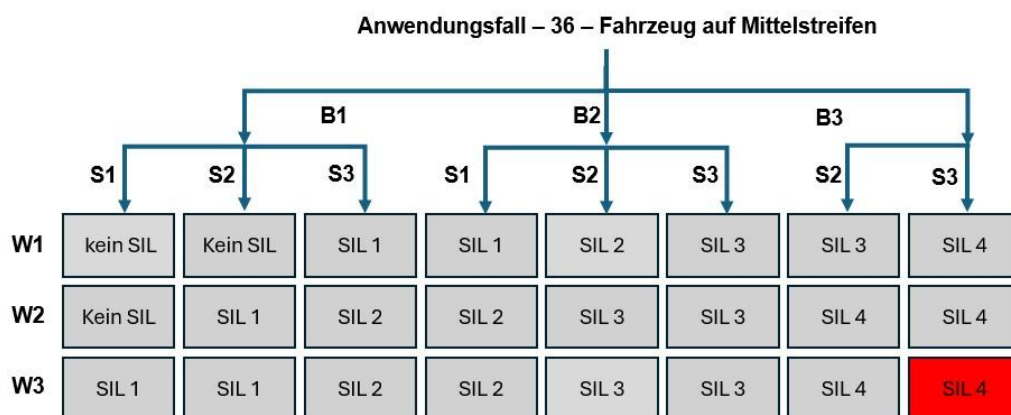


Abbildung 48 – Bewertung Anwendungsfall 36 – eigene Darstellung

In Abbildung 48 ist die Bewertung des Anwendungsfalls 36 anhand des entwickelten Risikographen dargestellt. Es soll ein Fahrzeug überholt werden, welches sich auf dem Mittelstreifen bewegt. Die reduzierte Fahrbahnbreite und das unvorhersehbare Verhalten des Fahrzeugs erzeugen eine schlechte Beherrschbarkeit. Da bei einem fehlerhaften Eingriff eine Kollision mehrerer dynamischer Elemente anzunehmen ist, wird ein hohes Schadensausmaß festgelegt. In diesem Anwendungsfall wird ein Teleoperationsbedarf mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eingestuft. Unvorhersehbare Bedingungen stellen für ein Automatisiertes System eine besondere Herausforderung dar. Aus den Bewertungskriterien resultiert eine SIL-4 Einstufung.

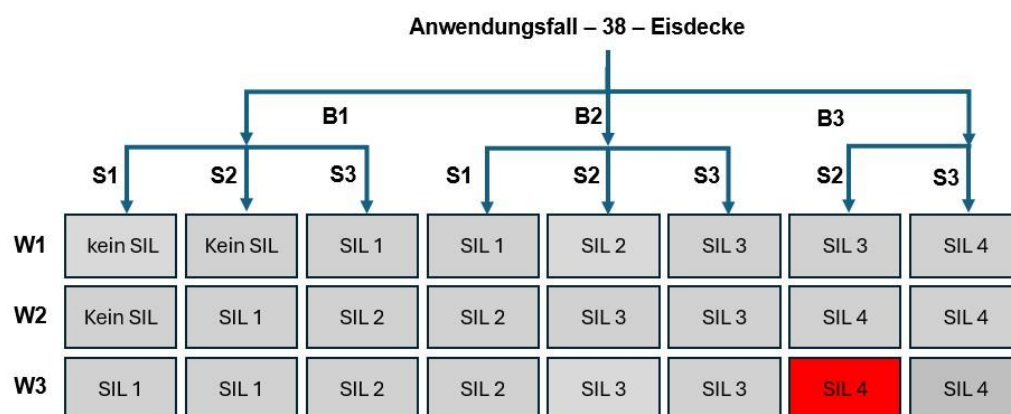


Abbildung 49 – Bewertung - Anwendungsfall 38 – eigene Darstellung

In Abbildung 49 ist die Bewertung des Anwendungsfalls 38 in Form des entwickelten Risikographen dargestellt. Eine Eisdecke und daraus resultierende stark reduzierte Traktion auf der Fahrbahn beeinträchtigen das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten des Fahrzeugs stark. Der Anwendungsfall wird demnach als schwer beherrschbar eingestuft. Ein

fehlerhafter Eingriff kann zu einem unvorhersehbaren Fahrverhalten des Fahrzeugs führen. Eine Kollision mit anderen dynamischen Objekten ist jedoch nicht zwangsläufig anzunehmen. Es resultiert ein moderates Schadensausmaß. Die großen dynamischen Einflüsse führen zu der Festlegung, dass eine Teleoperation mit hoher Wahrscheinlichkeit angefordert wird. Aus den Bewertungskriterien resultiert eine SIL-4 Einstufung.

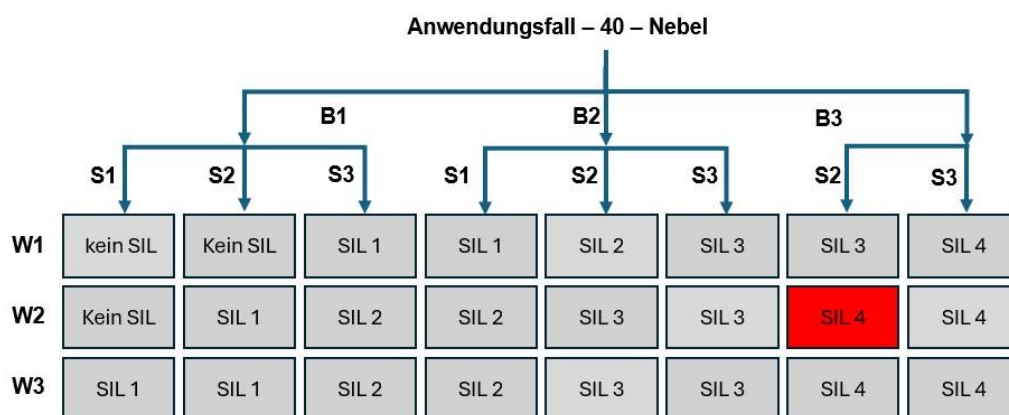


Abbildung 50 – Bewertung Anwendungsfall 40 – eigene Darstellung

In Abbildung 50 ist die Bewertung des Anwendungsfalls 40 anhand des entwickelten Risikographen dargestellt. Durchgehender Nebel stellt eine Beeinträchtigung des Sichtfeldes dar. Die Beherrschbarkeit wird daher als schlecht eingeordnet. Ein fehlerhafter teleoperativer Eingriff kann zu hohen Sachschäden in Verbindung mit Personenschäden resultieren, da eine Kollision mit statischen Elementen angenommen werden kann. Eine Kollision mit anderen dynamischen Objekten kann nicht zwangsläufig geschlussfolgert werden. Es resultiert ein moderates Schadensausmaß. Die Wahrscheinlichkeit, dass der vorliegende Anwendungsfall eine Teleoperation bedarf, wird im mittleren Bereich eingestuft. Aus dieser Bewertung geht ein SIL-4 Wert hervor

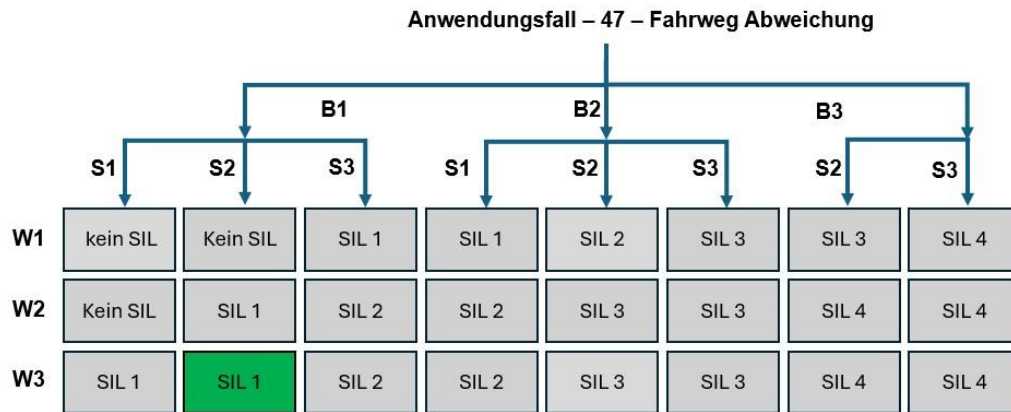


Abbildung 51 – Bewertung Anwendungsfall 47 – eigene Darstellung

In Abbildung 51 ist die Bewertung des Anwendungsfalls 47 anhand des Risikographen der entwickelten Methodik dargestellt. Der mögliche Fahrweg weicht von den Kartendaten ab und soll festgelegt werden. Es tritt keine weitere Einschränkung auf. Der Anwendungsfall wird demnach als gut beherrschbar eingestuft. Aufgrund der minimalen mittleren Geschwindigkeiten auf Autobahnen wird das Schadensausmaß bei einem fehlerhaften Eingriff des Teleoperators als moderat eingestuft. Die Wahrscheinlichkeit, dass in diesem Anwendungsfall eine Teleoperation notwendig ist, wird als hoch eingestuft, da eine Unstimmigkeit gemessener und gespeicherter Daten einen Entscheidungsbedarf annehmbar macht. Aus den Bewertungskriterien resultiert ein SIL-1 Wert.

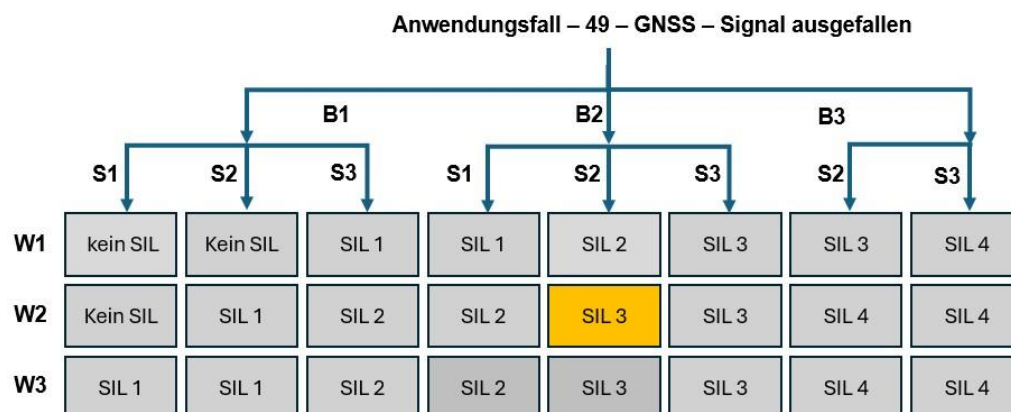


Abbildung 52 – Bewertung Anwendungsfall 49 – eigene Darstellung

In Abbildung 52 ist die Bewertung des Anwendungsfalls 49 anhand des entwickelten Risikographen dargestellt. Es soll anhand von Umfeldmerkmalen der Standort des Fahrzeugs bestimmt werden. Die Komplexität dieser Aufgabe erzeugt eine eingeschränkte Beherrschbarkeit. Eine Kollision mit anderen dynamischen Elementen kann nicht direkt angenommen

werden. Es wird daher ein moderates Schadensausmaß bei einem fehlerhaften teleoperativen Eingriff festgelegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Anwendungsfall eine Teleoperationsbedarf auslöst, wird als gering eingestuft. Das automatisierte System kann die Weiterfahrt auch ohne gültiges Positionssignal für eine gewisse Zeit gewährleisten. Ein kurzer Signalausfall macht eine Teleoperation nicht notwendig. Ein kompletter dauerhafter Signalausfall würde einen Teleoperationsbedarf mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auslösen. Demnach wird eine mittlere Wahrscheinlichkeit festgelegt. Aus den Bewertungskriterien resultiert ein SIL-3 Wert.

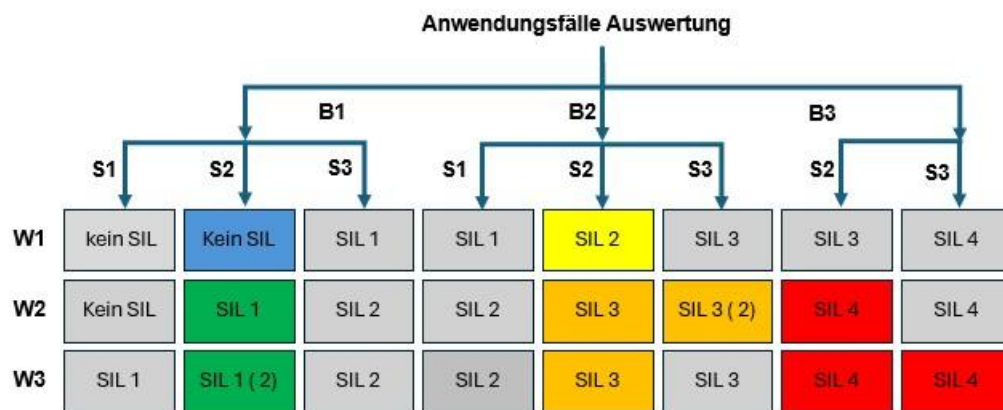


Abbildung 53 – Auswertung Anwendungsfälle – eigene Darstellung

In Abbildung 53 sind die Ergebnisse der Risikobewertung dargestellt. Es wurden hierzu alle zwölf bewerteten Anwendungsfälle eingeordnet. Diese Einordnung resultiert aus der Parameterkonfiguration der Beherrschbarkeit, des Schadensausmaßes und der Wahrscheinlichkeit. Einmal wurde der Anwendungsfall mit keiner SIL-Stufe belegt. Drei Mal wurde eine SIL-1 Einstufung getroffen. Ein Anwendungsfall wurde mit SIL-2 bewertet. Vier Anwendungsfälle wurden mit SIL-3 bewertet. Die übrigen drei Anwendungsfälle wurden mit SIL-4 bewertet. Es kommen somit alle möglichen SIL-Werte mindestens einmal vor. Zwei Parameterkonfigurationen wurde zweimal belegt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass acht der zwölf Anwendungsfälle mindestens SIL-3 zugeordnet wurden. Die Mehrheit der untersuchten Fälle liegt somit im oberen Bereich des verwendeten Risikographen. Zudem ist ersichtlich, dass die höchsten Risikoeinstufungen in der vierten und fünften Schicht nach PEGASUS getroffen wurden.

5 Untersuchung Einflussgrößen Teleoperation

Eine erfolgreiche Teleoperation lässt sich in Hinsicht der Informationsübertragung und -verarbeitung in drei wesentliche Einflussbereiche unterscheiden. Die Umgebung muss fahrzeugseitig erfasst, über eine Kommunikationsverbindung übertragen und durch den Bediener wahrgenommen werden. Im Rahmen der experimentellen Untersuchung von Einflussgrößen soll die fahrzeugseitige visuelle Umwelterfassung untersucht werden. Die Untersuchung betrachtet den Einfluss von definierten optischen Sichtbeeinträchtigungen an zwei unterschiedlichen Kamerasystemen. Es sollen die übertragenen visuellen Informationen aufgenommen und anhand verschiedener Kriterien bewertet werden.

5.1 Entwicklung und Aufbau des Teleoperationsdemonstrators

In Erweiterung des praktischen Teils einer zuvor verfassten Studienarbeit, wurde in einer Tätigkeit als Studentische Hilfskraft ein Teleoperationssystem an der Westsächsischen Hochschule Zwickau durch den Verfasser dieser Diplomarbeit entwickelt. Dieses Teleoperationssystem besteht aus einem Raspberry Pi 5, einem WaveShare 3S Akkumodul, einem Raspberry Pi Kameramodul 2 und der Aktorik eines LEGO City Güterzugs. Der LEGO City Güterzug kann in seiner Grundausstattung über Bluetooth mit einer Fernbedienung und einer App ferngesteuert werden. Für diese Fernsteuerung muss der Bediener jedoch in direkter Sichtweite zum Fahrzeug bleiben. Eine Teleoperation außerhalb der Sichtweite ist somit nicht möglich. Die entwickelte Erweiterung ermöglicht eine komplett neue Steuerung, inklusive einer Videoübertragung und weiterer Fahrzeugdaten, die für eine Teleoperation notwendig sind. Die notwendige Energieversorgung stellt ein WaveShare Akkumodul durch drei Lithium-Ionen-Akkus zur Verfügung. Dieses Modul bietet eine konstante Regelung auf 5V und 5A, die für den Einplatinencomputer Raspberry Pi notwendig sind. Es werden die Motoren des LEGO-Zugs, inklusive des LEGO HUBs, welcher über Bluetooth die Steuerungsbefehle empfängt, weiterverwendet. Der Raspberry Pi5 ist das Rechenzentrum des Fahrzeugsystems. Er kommuniziert mit dem LEGO-Hub wie gewohnt über Bluetooth und kann somit die Motoren ansteuern. Der Unterschied zur Originalversion von LEGO ist, dass die Bluetooth Kommunikation nun nur noch direkt auf dem Fahrzeug erfolgt. Die Kommunikation vom Leitstand zum Fahrzeug erfolgt über ein 5 GHz Wifi- Netzwerk. Dieses Netzwerk kann vom Fahrzeug lokal ausgesendet werden. Alternativ kann auch ein vorhandenes Netzwerk eines Routers verwendet werden. Der Raspberry Pi nimmt die Bilddaten der Kamera,

sowie die Informationen zum Ladezustand der Akkus auf und überträgt diese in das Netzwerk. Dargestellt werden diese Informationen in einer selbst entwickelten Teleoperationsoberfläche. Diese Oberfläche kann von jedem Smartphone, Tablet und PC, dass sich im selben Netzwerk wie das Fahrzeug befindet, über einen Link im Browser verwendet werden. Die Oberfläche wurde mit Python programmiert. In der Oberfläche werden Steuerungsmöglichkeiten vorgegeben, die eine Eingabe über den Touchscreen, Mausklick und der Tastatur ermöglichen. Es kann die Fahrtrichtung und die Geschwindigkeit gesteuert werden. Zudem kann das Bild optisch verkleinert und vergrößert werden. Dieser Stand wurde parallel zu dieser Diplomarbeit in der Tätigkeit als Studentische Hilfskraft aufgebaut. Innerhalb dieser Diplomarbeit wurde eigenständig durch den Verfasser ein weiteres System gebaut und weiterentwickelt. Dieses System verwendet zwei unterschiedliche Kameramodule parallel. Es kann somit während der Teleoperation zwischen den Kameras geschaltet werden. Die notwendigen Anpassungen des Quellcodes für das Interface wurden ebenso im Verlauf dieser Arbeit weiterentwickelt. Der erweiterte Quellcode wird im Anhang zur Verfügung gestellt. Die Kameramodule sind definiert durch Schraubverbindungen am Fahrzeug befestigt. Zudem gibt es die Möglichkeit Blenden hinzuzufügen. Diese Blenden sollen definierte Sichtbeeinträchtigungen erzeugen. In den folgenden Abschnitten wird der erweiterte Aufbau vorgestellt.

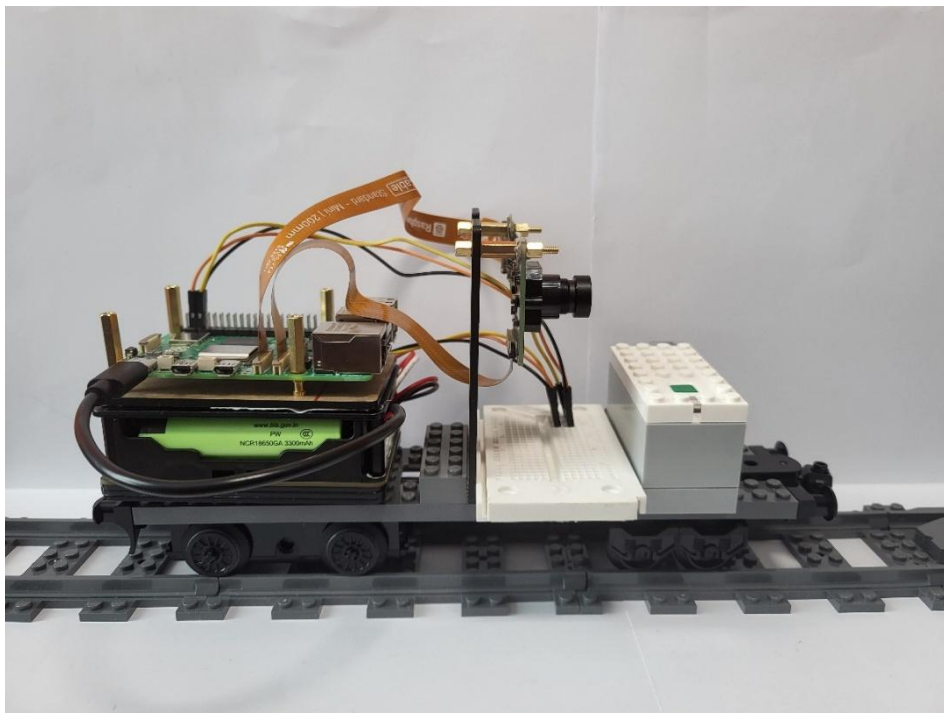


Abbildung 54 – Teleoperation Zug - Seitenansicht – eigene Aufnahme

In Abbildung 54 ist die Seitansicht des entwickelten Aufbaus dargestellt. Auf der linken Seite oben ist der Raspberry Pi 5 erkennbar. Die Platine wird durch einen USB C Anschluss mit maximal 5V und 5A mit elektrischer Energie versorgt. In die Platine führen zwei kupferfarbene Flachbandkabel. Diese Kabel bilden die Verbindung zu den Kameramodulen. Hinten links sind drei Dupont- Kabel an den Pin- Anschlüssen des Raspberry Pi befestigt. Diese Kabel übertragen die Informationen zur Auswertung der Akkudaten. In der Mitte ist die Befestigung der Kameramodule zu erkennen. Sichtbar ist nur Kameramodul 1, das Kameramodul 2 überdeckt. Die Kameramodule werden in einer folgenden Ansicht vorgestellt. Rechts neben der Befestigung der Kameramodule befindet sich ein Steckbrett. Dieses Steckbrett stellt die Verbindung des Raspberry Pi zu dem Akkumodul da. Die vorhandenen Male-Female-Dupont Kabel haben keine direkte Verbindung ermöglicht. Zuletzt ist am rechten Ende der Abbildung der LEGO-HUB zu erkennen.

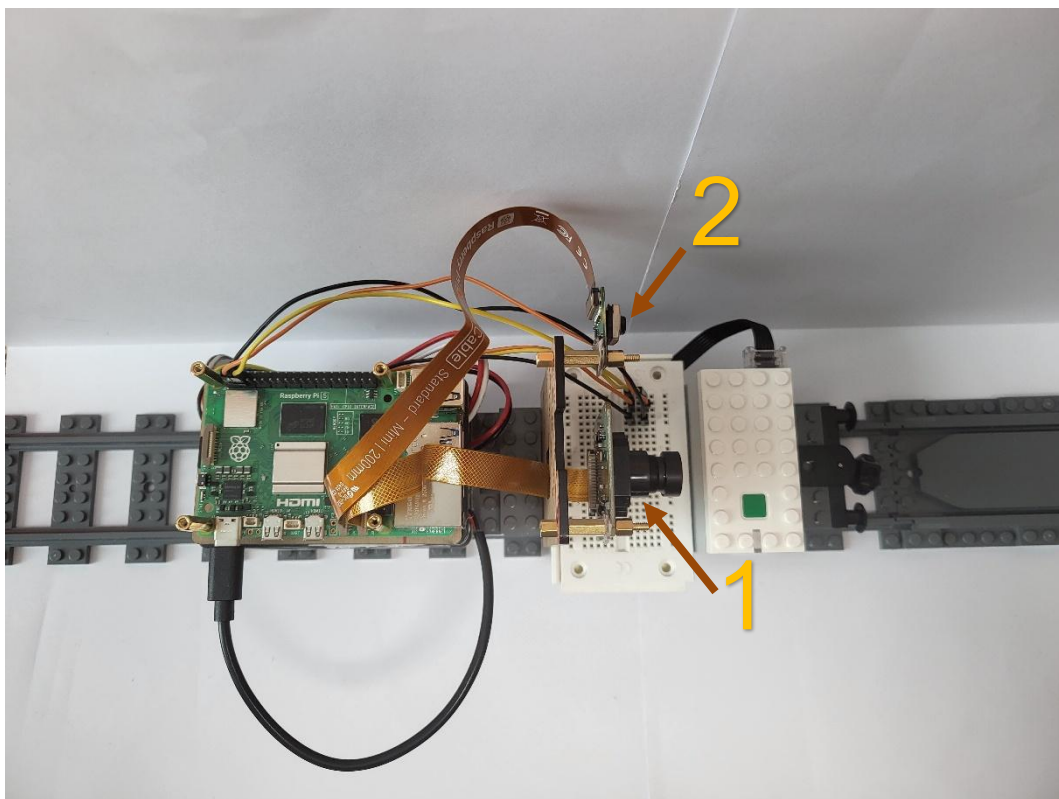


Abbildung 55 – Teleoperationssystem Zug - Draufsicht – eigene Aufnahme

In Abbildung 55 ist die Draufsicht des entwickelten Teleoperationssystem dargestellt. Es ist nun möglich beide Kameramodule zu erkennen. Die untere Kamera mit dem Symbol 1 ist das Pi-Kamera-OV5647-Modul. Der horizontale Öffnungswinkel beträgt 72° . Die maximale Auflösung beträgt 5 Megapixel. Es ist somit eine horizontale Darstellung mit 2592 Pixeln und eine vertikale Darstellung mit 1944 Pixeln möglich. Der Fokus ist manuell einstellbar.

Es sind vier Glaslinsen und ein Infrarotfilter verbaut (Amazon, 2026). Im weiteren Verlauf wird diese Kamera als Kamera 1 (K1) bezeichnet. Die obere Kamera mit dem Symbol 2 ist das Raspberry Pi Kamera Modul 3. Der Kamerasensor stammt von dem Hersteller Sony. Der horizontale Öffnungswinkel beträgt 66° . Die maximale Auflösung beträgt 11,9 Megapixel. Es ist somit eine horizontale Darstellung mit 4608 Pixeln und eine vertikale Darstellung mit 2592 Pixeln möglich. Die Kamera besitzt eine PDAF- Autofokus und einen Infrarot Sperrfilter (RaspberryPiLtd, 2024). Im weiteren Verlauf wird diese Kamera als Kamera 2 (K2) bezeichnet. Für gleiche Versuchsbedingungen wurde die Auflösung beider Kameras auf 1920x1080 Pixel begrenzt.

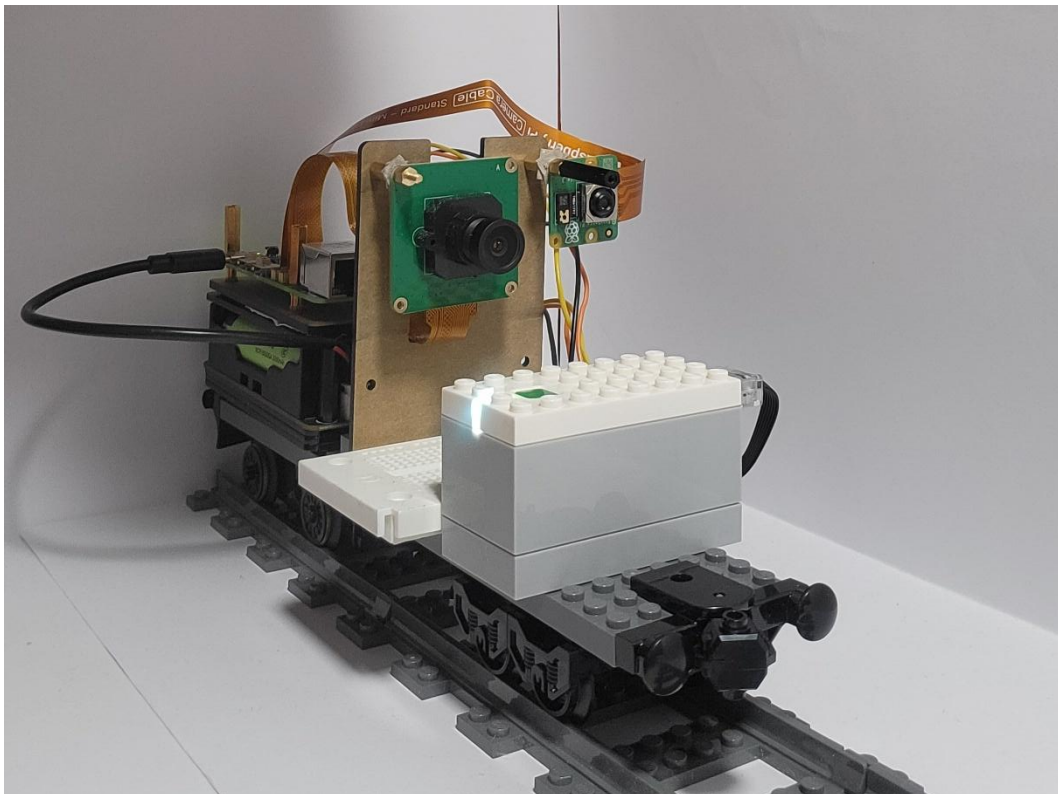


Abbildung 56 – Teleoperationssystem Zug - Schrägansicht – eigene Aufnahme

In Abbildung 56 ist eine Schrägansicht des entwickelten Teleoperationssystems dargestellt. In der Mitte ist die braune Befestigungseinheit für die Kameramodule sichtbar. Beide Kameramodule sind nun von vorn erkennbar. An der rechten Kamera befindet sich zudem ein Verschraubungspunkt, der im weiteren Verlauf für die Befestigung der Blenden dient. Dieser Verschraubungspunkt ist der schwarze Fortsatz der Kamerabefestigung.

5.2 Experimentelle Untersuchung optischer Sichtbeeinträchtigungen

In diesem Kapitel soll der Versuchsaufbau der experimentellen Untersuchung vorgestellt werden. Der Versuchsaufbau wurde mit dem kostenlosen Programm LibreCAD erstellt. Alle relevanten Bestandteile wurden in ihrer Position bemaßt aufgezeichnet, um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

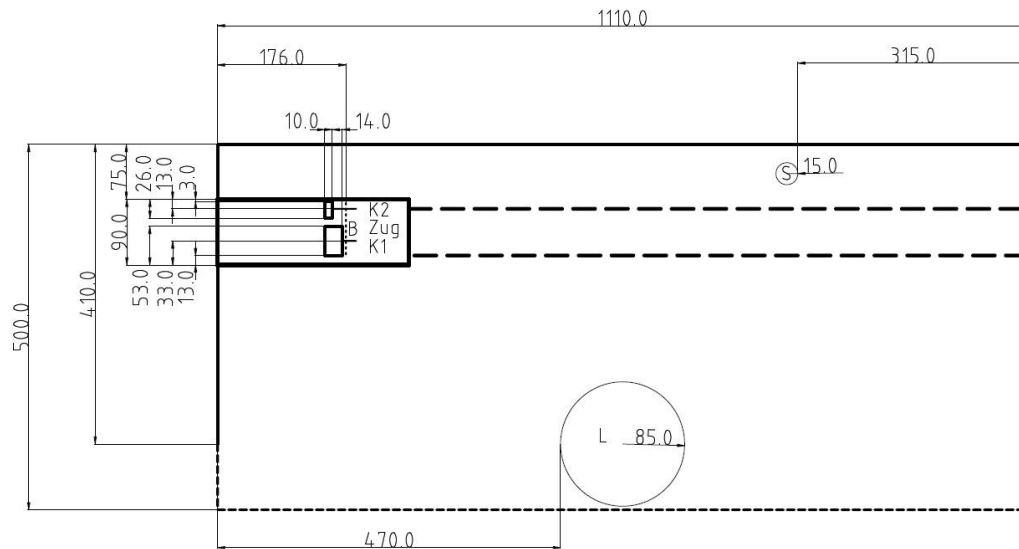


Abbildung 57 – Versuchsaufbau - Zeichnung – eigene Darstellung

In Abbildung 57 ist der Versuchsaufbau der experimentellen Untersuchung dargestellt. Im rechten oberen Bereich befindet sich ein kreisförmiges Element mit der Bezeichnung S. Das S steht hierbei als Abkürzung für das Signal. Es ist ein selbst gebautes Geschwindigkeitssignal. Unten in der Mitte befindet sich ein größeres Kreiselement mit der Bezeichnung L. Das L steht hierbei als Abkürzung für die Lichtquelle. Die Lichtquelle ist ein „LUMUS Key Light“. In der linken oberen Ecke befindet sich das Teleoperationssystem. Es steht auf Schienen, welche gestrichelt dargestellt sind. Die Kameras werden mit K1 für Kamera 1 und K2 für Kamera 2 bezeichnet. Rechts neben den Kameras befindet sich die Blende, gestrichelt dargestellt und mit B abgekürzt. Die Öffnungswinkel beider Kameras zeigen zu dem Signal.



Abbildung 58 – Versuchsaufbau - Kamerabild – eigene Aufnahme

In Abbildung 58 ist der reale Versuchsaufbau abgebildet. Es wurde in den relevanten Bereichen ein weißer Untergrund und Hintergrund gewählt. Es sollen dadurch die Einflüsse des Umfelds minimiert werden. Es sollten bei konstanter Belichtung und Positionen aller Elemente nur die Beeinflussung der definierten Sichtbeeinträchtigungen in Abhängigkeit des Kamaramoduls untersucht werden. Die Helligkeitsstufe der Lichtquelle wurde im niedrigsten Bereich eingestellt, da bei einer Erhöhung keine sichtbaren Veränderungen festgestellt werden konnten.

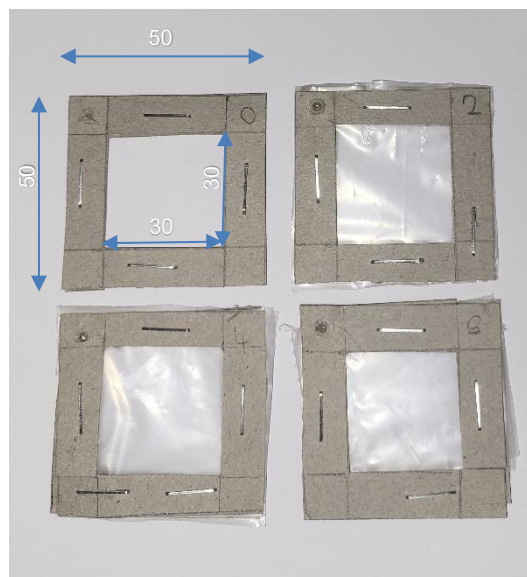


Abbildung 59 – Blenden Sichtbeeinträchtigung – eigene Aufnahme

In Abbildung 59 sind die Blenden dargestellt, welche zur Versuchsdurchführung verwendet wurden. Es sind vier unterschiedliche Blenden gebaut wurden. Diese Blenden bestehen aus zwei Pappe- und einer verschiedenen Anzahl von Folieschichten. Die Folieschichten sind Ausschnitte aus ALDI Gefrierbeuteln der Größe 3L. Alle Blenden haben ein Außenmaß von 50x50 Millimetern und einen Innenmaß von 30x30 Millimetern. Die Blende oben links wurde mit der Ziffer 0 markiert. Die Blende 0 besitzt keine Folieschicht und soll die Ansicht ohne Beeinträchtigung gewährleisten. Die Blende oben rechts mit der Markierung 2 besitzt zwei Folieschichten und soll die kleinste Beeinträchtigung erzeugen. Die Blende unten links mit

der Nummer 4 besitzt vier Folieschichten und soll die mittlere Beeinträchtigung erzeugen. Die Blende unten rechts mit der Nummer 6 besitzt sechs Folieschichten und soll die höchste Beeinträchtigung erzeugen.

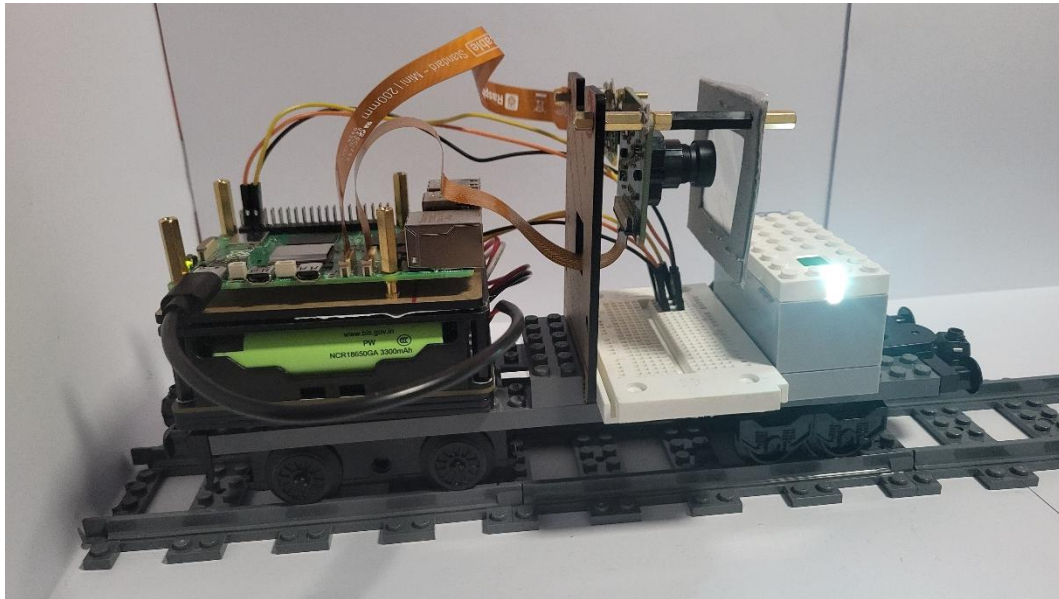


Abbildung 60 - Montage Blende – eigene Aufnahme

In Abbildung 60 ist die Montage der Blende dargestellt. Die Blenden werden durch eine Verlängerung des Befestigungspunktes der Kamera anhand einer Schraubverbindung montiert. Die Verlängerung und die Blende können von beiden Seiten an beiden Kameras angebracht werden.

5.3 Ergebnisse des Versuchs

Die qualitative Bewertung der visuellen Informationsbereitstellung erfolgt durch eine Einstufung der Erkennbarkeit des Signals in drei Kategorien. Zum einen soll die Erkennbarkeit der Signalart, der Farbgebung und der genauen Kennziffer beurteilt werden. Es erfolgt eine Bewertung in vier Stufen. Es wird zwischen einer sehr guten, guten, eingeschränkten, stark eingeschränkten und keiner Erkennbarkeit unterschieden.

Bei einer sehr guten Erkennbarkeit ist das Merkmal eindeutig und ohne erkennbare Einschränkung identifizierbar.

Ein Merkmal ist gut erkennbar, wenn es eindeutig identifizierbar ist. Es treten jedoch sichtbare Beeinträchtigungen auf.

Eine eingeschränkte Erkennbarkeit erzeugt eine mittlere Beeinträchtigung auf die Identifizierbarkeit des Merkmals. Das Merkmal nicht mehr eindeutig identifizierbar.

Bei einer stark eingeschränkten Erkennbarkeit ist das Merkmal nur noch teilweise und mit erheblicher Unsicherheit identifizierbar.

Wird die Abbildung mit keiner Erkennbarkeit eingestuft, ist das Merkmal nicht mehr identifizierbar.

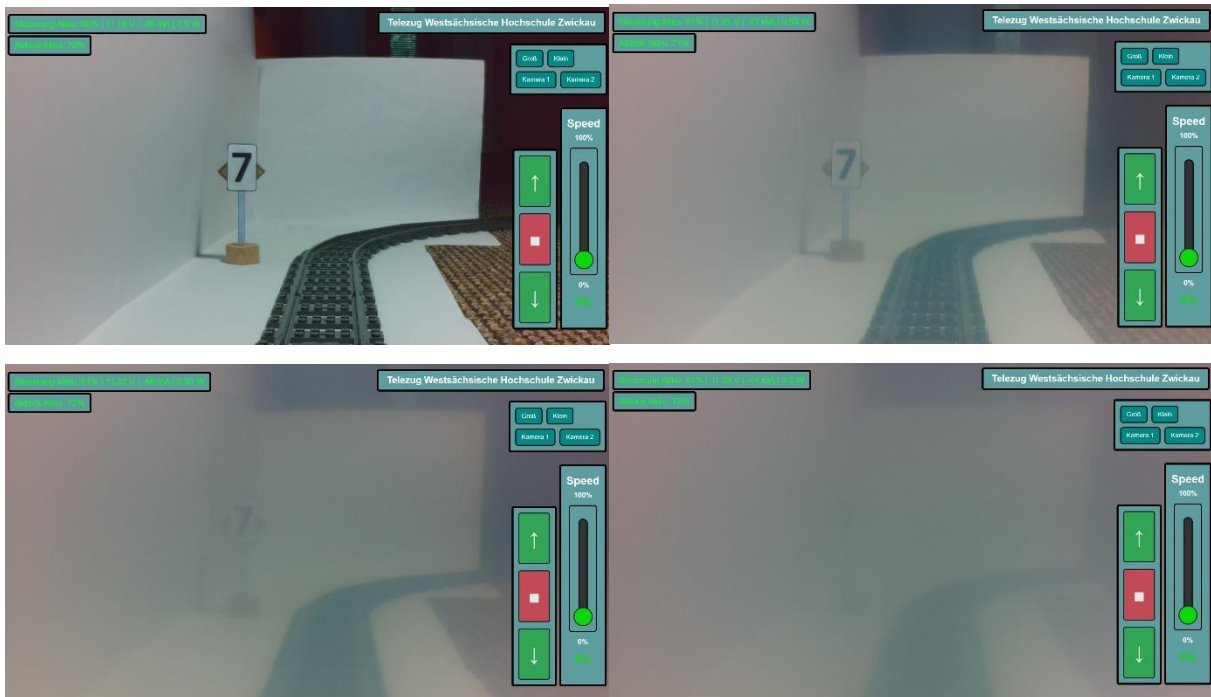


Abbildung 61 – Ergebnisse Kamera 1 – eigene Aufnahme

In Abbildung 61 sind die Ergebnisse des Versuchs mit der Kamera 1 dargestellt. Oben links ist die Aufnahme mit der Blende 0 abgebildet. Oben rechts ist die Aufnahme mit der Blende 2 abgebildet. Unten links ist die Aufnahme mit der Blende 4 abgebildet. Unten rechts ist die Aufnahme mit der Blende 6 abgebildet. Mit der zunehmenden Anzahl der Folien ist eine deutliche Abnahme des Detaillierungsgrades und des Kontrastes zu erkennen.

Tabelle 1 - Ergebnisse Erkennbarkeit - Kamera 1

Folienlagen	Signal Lf 7	Farbgebung	Kennziffer
0	sehr gut	sehr gut	sehr gut
2	gut	eingeschränkt	gut
4	eingeschränkt	stark eingeschränkt	eingeschränkt

6	keine	keine	stark eingeschränkt
---	-------	-------	---------------------

In Tabelle 1 ist die Bewertung der experimentellen Untersuchung von Einflussgrößen für die Kamera 1 dargestellt. Ohne eine Sichtbeeinträchtigung sind alle betrachteten Merkmale ohne Einschränkung erkennbar. Die Aufnahme in Abhängigkeit der Blende 1, kein Folienschichten, wurde in allen Kategorien als sehr gut erkennbar eingestuft. Für die Aufnahme in Abhängigkeit der Blende 2, zwei Folienschichten, wurde das Signal, sowie die Kennziffer als gut erkennbar und die Farbgebung als eingeschränkt erkennbar eingestuft. Das Signal und die Kennziffer sind noch eindeutig erkennbar. Ein deutlich verringerter Kontrast schränkt die Farbgebung ein. Die Aufnahme in Verbindung mit der Blende 3, vier Folienschichten, wurde in Hinsicht des Signals, sowie der Kennziffer als eingeschränkt erkennbar und in Hinsicht der Farbgebung als stark eingeschränkt erkennbar eingestuft. Kein Merkmal kann eindeutig identifiziert werden. Die Farbgebung kann nur mit einer großen Unsicherheit identifiziert werden. Die Aufnahme in Verbindung mit der Blende 4, sechs Folienschichten, wurde in Hinsicht des Signals, sowie der Farbgebung mit keiner Erkennbarkeit und in Hinsicht der Kennziffer als stark eingeschränkt erkennbar eingestuft.

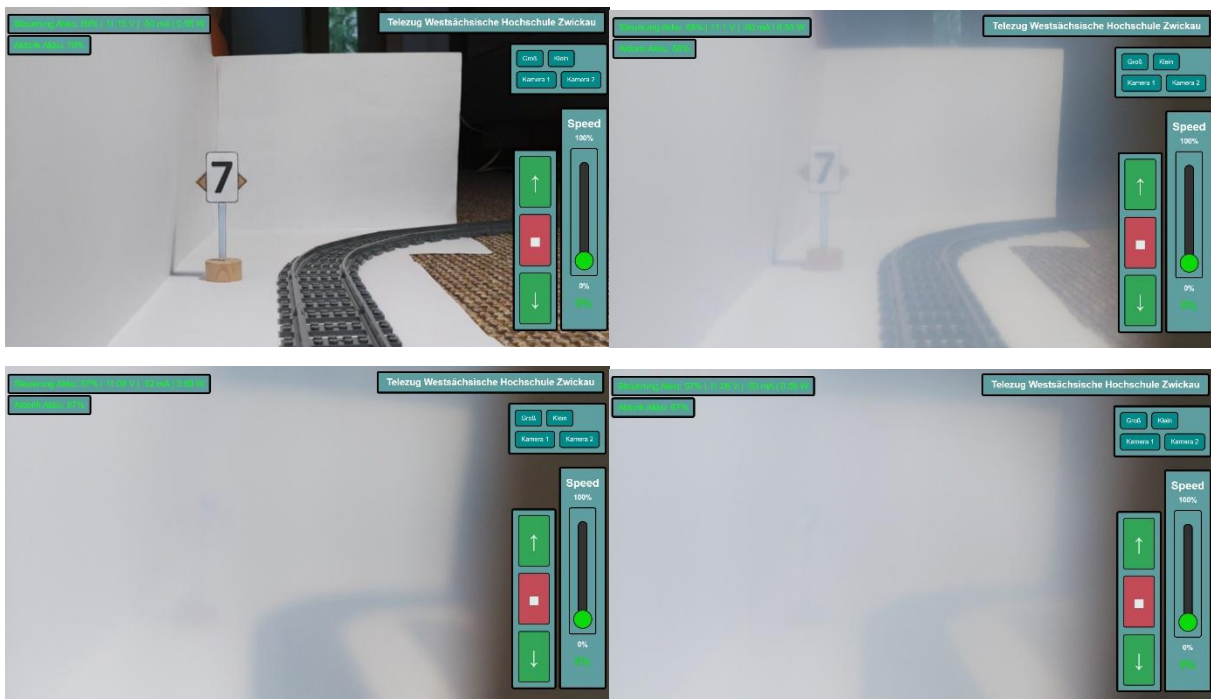


Abbildung 62 – Ergebnisse Kamera 2 – eigene Aufnahme

In Abbildung 62 sind die Ergebnisse des Versuchs mit der Kamera 2 dargestellt. Oben links ist die Aufnahme mit der Blende 0 dargestellt. Oben rechts ist die Aufnahme mit der Blende

2 abgebildet. Unten links ist die Aufnahme mit der Blende 4 abgebildet. Unten rechts ist die Aufnahme mit der Blende 6 abgebildet. Mit der zunehmenden Anzahl der Folien ist eine deutliche Abnahme des Detaillierungsgrades und des Kontrastes zu erkennen.

Tabelle 2 - Ergebnisse Erkennbarkeit - Kamera 2

Folienlagen	Signal Lf 7	Farbgebung	Kennziffer
0	sehr gut	sehr gut	sehr gut
2	eingeschränkt	stark eingeschränkt	eingeschränkt
4	keine	keine	kein
6	keine	keine	keine

In Tabelle 2 ist die Bewertung der experimentellen Untersuchung von Einflussgrößen für die Kamera 2 dargestellt. Ohne eine Sichtbeeinträchtigung sind alle betrachteten Merkmale ohne Einschränkung erkennbar. Die Aufnahme in Abhängigkeit der Blende 1, kein Folienschichten, wurde in allen Kategorien als sehr gut erkennbar eingestuft. Die Aufnahme in Verbindung mit der Blende 2, zwei Folienschichten, wurde in Hinsicht des Signals, sowie der Kennziffer als eingeschränkt erkennbar und in Hinsicht der Farbgebung als stark eingeschränkt erkennbar eingestuft. Kein Merkmal kann eindeutig identifiziert werden. Für die übrigen beiden Blenden, mit vier und sechs Folienschichten, wurden alle Kategorien mit keiner Erkennbarkeit eingestuft. In Abhängigkeit der Blende 3 und 4 sind keine Merkmale identifizierbar. Aus dieser Bewertung resultiert, dass die Abnahme der visuellen Informationen bei der Kamera 2 viel stärker zunimmt als bei der Kamera 1. Der direkte Vergleich soll in den folgenden Abschnitten gezeigt werden. Dieser Vergleich ist relativ und bezieht sich darauf, welche von beiden Kameras in der jeweiligen Kategorie die bessere Informationsdarstellung erzeugt. Es kann somit Kamera 1 oder Kamera 2 als führend eingestuft werden. Es ist auch möglich das beide gleichwertig eingestuft werden. Analog zum Versuchsaufbau wird die Aufnahme von Kamera 2 jeweils links und von Kamera 1 jeweils rechts dargestellt.

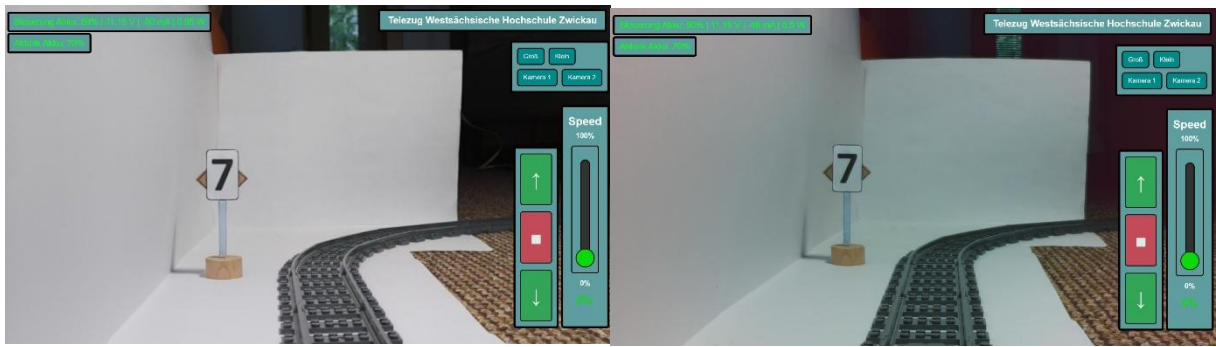


Abbildung 63 – Ergebnis Blende 1 - Kamera 2 - Kamera 1 – eigene Aufnahme

In Abbildung 63 ist der Vergleich der Aufnahmen beider Kameras in Verbindung der Blende 0 dargestellt. Die Versuchsumgebung ist in beiden Aufnahmen klar dargestellt. Das Signal ist in allen zuvor definierten Kategorien eindeutig erkennbar. Die Konturen des Fahrweges sind klar abgrenzbar. Es ist eine unterschiedliche Bildcharakteristik zu erkennen. Die Aufnahme von Kamera 2, links dargestellt, wirkt heller. Die Darstellung des Signals und der Kennziffer ist deutlich abgegrenzter. In Hinsicht der Erkennbarkeit des Signals und der Kennzahl wird die Kamera 2 als führend eingestuft. Die Aufnahme der Kamera 1, rechts dargestellt, wirkt dunkler und kontrastreicher. Die Kamera 1 wird demnach in der Farbgebung als führend eingestuft. Trotz der fehlenden Sichtbeeinträchtigung ist die Farb- und Helligkeitswiedergabe bei beiden Kameras dennoch unterschiedlich.

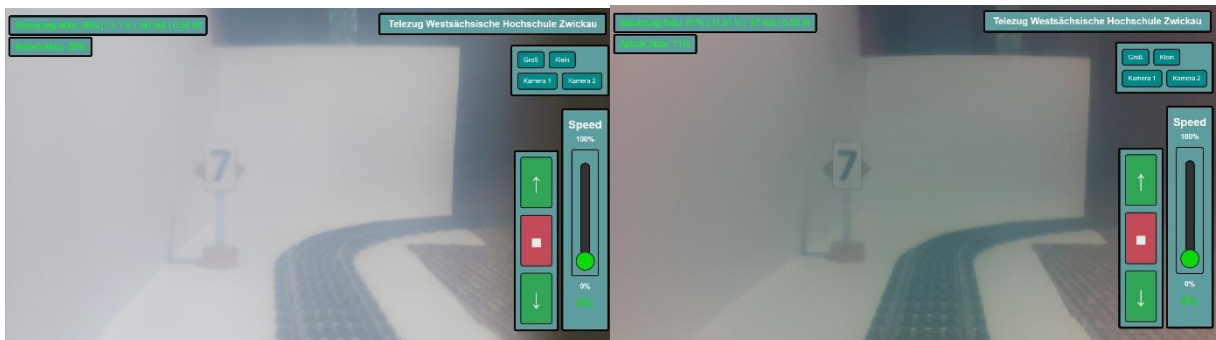


Abbildung 64 – Ergebnis Blende 2 - Kamera 2 - Kamera 1 – eigene Aufnahme

In Abbildung 64 ist der Vergleich der Aufnahmen beider Kameras in Verbindung der Blende 2 dargestellt. Die Blende 2 erzeugt bei beiden Kameras eine deutliche Beeinträchtigung der Bildqualität. Die Versuchsumgebung ist nicht mehr klar dargestellt. Die Kamera 1, rechts dargestellt, hebt das Signal deutlicher vom Hintergrund ab und weist einen höheren Kontrast auf. Die Kennziffer ist ebenso deutlich abgegrenzter erkennbar. Kamera 1 wird demnach im direkten Vergleich in allen Kategorien als führend eingestuft.

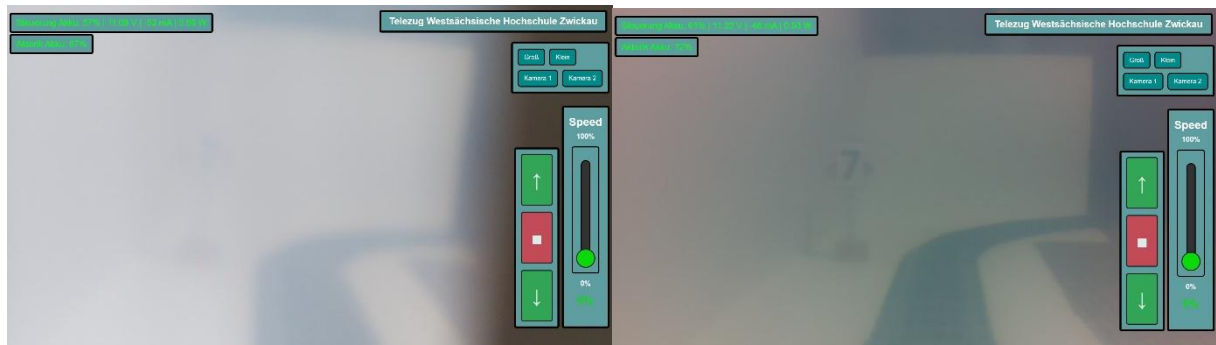


Abbildung 65 – Ergebnis Blende 3 - Kamera 2 - Kamera 1 – eigene Aufnahme

In Abbildung 65 ist der Vergleich der Aufnahmen beider Kameras in Verbindung der Blende 3 dargestellt. Die Versuchsumgebung inklusive des Fahrwegs sind in beiden Aufnahmen stark eingeschränkt erkennbar. Das Signal ist in der Aufnahme der Kamera 2, links dargestellt, in keinen Kategorien erkennbar. In der Aufnahme der Kamera 1, rechts dargestellt, ist das Signal, die Farbgebung und die Kennziffer eingeschränkt bis stark eingeschränkt erkennbar. Kamera 1 wird somit in allen Kategorien als führend eingestuft.

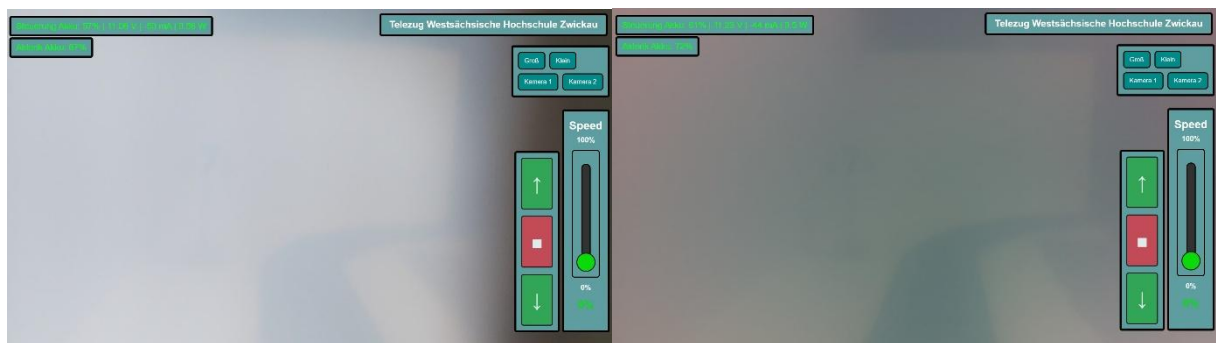


Abbildung 66 – Ergebnis Blende 4 - Kamera 2 - Kamera 1 – eigene Aufnahme

In Abbildung 66 ist der Vergleich der Aufnahmen beider Kameras in Verbindung der Blende 4 dargestellt. In der Aufnahme der Kamera 2, links dargestellt, ist das Signal in keinen Merkmalen erkennbar. In der Aufnahme der Kamera 1, rechts dargestellt, ist die Kennziffer sehr schwach wahrnehmbar. Die Farbgebung und das Signal wurden mit keiner Erkennbarkeit eingestuft. Die Kamera 1 wird somit in allen Kategorien als führend bewertet.

Tabelle 3 - Ergebnisse Vergleich - Kamera 1 - Kamera 2

Folienlagen	Signal Lf 7	Farbgebung	Kennziffer
0	K2	K1	K2
2	K1	K1	K1

4	K1	K1	K1
6	K1	K1	K1

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse des direkten Vergleichs der Informationsbereitstellung beider Kamerasysteme in Abhängigkeit der Beeinträchtigung durch die Blenden dargestellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass Kamera 2 ohne Beeinträchtigung in den meisten Kategorien vorn liegt. Ab einer Beeinträchtigung von mindestens zwei Folien ist Kamera 1 überlegen. Nach den technischen Daten ist Kamera 2 in den relevanten Kategorien, wie der der Sensorgröße weiterentwickelt. Unter den gewählten Versuchsbedingungen weist jedoch Kamera 1 eine höhere Robustheit in Hinsicht der visuellen Informationsdarstellung auf. Bei der Auswahl eines Kamerasystems sollte somit nicht nur die Größe einzelner technischer Daten betrachtet werden.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Identifikation

Die entwickelte Methodik untersucht systematisch das Sechs- Schichten- Modell nach der PEGASUS - Methodik. Durch die sechs Schichten wird der Betrachtungsraum systematisch geteilt. Innerhalb dieser Methodik erfolgte die Anwendung im Betrachtungsraum der deutschen Autobahn. Die entwickelte Methodik sieht eine Übertragbarkeit auf andere Betriebsbereiche vor. Diese Übertragbarkeit wurde jedoch noch nicht untersucht. Es wird auf jede Schicht dieselbe Identifikationslogik angewendet. Der ursprüngliche Zweck der PEGASUS Methodik war die Beschreibung von Szenarien. Diese Arbeit überträgt die Struktur demnach auf einen neuen Zweck. Es konnten 53 Anwendungsfälle identifiziert werden. Sie wurden alle tabellarisch im Anhang aufgeführt. Es wurden jeweils zwei Anwendungsfälle pro Schicht komplett abgeleitet und bewertet. Somit entstehen zwölf beschriebene Anwendungsfälle. Es wurde der entwickelte Ablauf in jeder Schicht angewendet. Das Ziel der Ausarbeitung war nicht eine gewisse Menge an Anwendungsfällen zu erzeugen. Es sollte die Funktionalität der Methodik an jeder Schicht untersucht und bewiesen werden. In einem Durchlauf des Identifikationsschemas können 54 Anwendungsfälle identifiziert werden. Ein Anwendungsfall fehlte in der Untersuchung demnach zur maximalen Auslastung. Innerhalb eines Hauptereignisses einer Schicht konnten demnach nur zwei Unterereignisse abgeleitet werden. Es wurde bewusst auf ein drittes Unterereignis verzichtet. Es konnte kein weiteres sachlich begründbares Ereignis identifiziert werden. Die entwickelte Struktur soll die Identifikation unterstützen. Es soll kein Ergebnis erzwungen werden. Somit könnte ein Hauptereignis drei, zwei oder auch nur ein Unterereignis hervorbringen. Grundsätzlich wurde die Struktur dreier Hauptereignisse, sowie dreier Unterereignisse pro Hauptereignis gewählt, um eine einheitliche überschaubare Struktur zu erzeugen. Das Hauptereignis soll eine übergeordnete Ereignisgruppe bilden. Hätte jedes Hauptereignis nur ein Unterereignis, wäre die Ableitung eher eine Konkretisierung. Deshalb soll in jedem Hauptereignis grundsätzlich Platz für mindestens zwei Unterereignisse sein. Es soll ebenso die Möglichkeit bestehen zusätzlichen Raum für ein drittes Unterereignis zu gewährleisten, um weitere relevante Ausprägungen zur identifizieren. Im Verlauf der Anwendung ergab sich ein großer Bedarf für den Raum des drittes Unterereignisses. Lediglich ein einziges drittes Unterereignis wurde nicht identifiziert. Die Kette aus Unterereignis, Hauptereignis und Endereignis erzeugt

zwangsläufig eine nachvollziehbare Herleitung des daraus entstehenden Teleoperationsbedarfs. Die Unterschiedlichen Schichten erzeugen eine große Vielfalt an möglichen Auslösern des Teleoperationsbedarfs. Die Struktur der PEGASUS - Methodik wurde somit als ersten Baustein verwendet. Innerhalb einer Schicht wurden Ereignisgruppen und schließlich spezifische Ereignisse gefunden, die zum Endereignis führen. Dieses Endereignis war in allen Fällen der Stillstand des automatisierten Systems. In Abhängigkeit des vorliegenden Anwendungsfalls wurde der Bedarf eines Eingriffs abgeleitet. Diese Interaktionen wurden bewusst allgemein gehalten und dienen als Unterstützungsvorschlag. Es soll damit die Verbindung geschaffen werden, inwiefern eine Teleoperation den Anwendungsfall lösen könnte, sobald das automatisierte System versagt. Es kann dadurch der erforderliche Unterstützungsbedarfs klassifiziert werden, ohne konkrete Festlegung der Mensch-Maschine-Interaktion. Es besteht somit eine gewisse Abhängigkeit von der betrachteten automatisierten Funktion. Es muss die Frage beantwortet werden, ob die Anwendungsfälle allgemein gültig für alle automatisierten Systeme sind. Leistungsfähigere Systeme könnten gegebenenfalls einige Anwendungsfälle jedes Mal selbst lösen. Es kann somit die Limitation aufgestellt werden, dass die identifizierten Anwendungsfälle nicht vollständig unabhängig von der automatisierten Funktion sind. Ein identifizierter Anwendungsfall setzt nicht voraus, dass bei jedem Auftreten eine Teleoperation erforderlich ist. In Abhängigkeit der konkreten Ausprägung des Anwendungsfalls und der Leistungsfähigkeit der automatisierten Funktion werden nur ein Teil der realen Eintritte eine Teleoperation erfordern. Dadurch muss nicht behauptet werden, dass ein identifizierter Anwendungsfall in jedem Fall eine Teleoperation bedarf.

6.2 Diskussion der Plausibilitätsprüfung und Szenario Bildung

Zunächst wurden die Schichten und die daraus resultierenden Anwendungsfälle einzeln betrachtet. Reale Fahrsituationen weisen jedoch Merkmale mehrerer Schichten gleichzeitig auf. Die Betrachtung eines einzelnen Anwendungsfalls gewährleistet somit nur eine Momentaufnahme. Es sollen daher mehrere Anwendungsfälle in einem Szenario kombiniert werden. Dieser Ansatz basiert auf der Logik die im Kapitel [2.3.1 Begriffe: Szene, Situation und Szenario](#) vorgestellt wurde. Szenarien werden aus einer Abfolge von Szenen gebildet. Der schichtabhängige Anwendungsfall übernimmt demnach die Rolle der Szene. Eine Abfolge mehrere Anwendungsfälle bildet das Szenario. Im vorgestellten Entscheidungsbaum der Szenariobildung wird systematisch jede Schicht durchlaufen. Es soll die Frage beantwortet werden soll, wo ein Anwendungsfall vorliegt. Die Abfolge des Durchlaufs gibt nicht

den zeitlichen Ablauf im Szenario wieder. Welche konkreten Szenarien aus der Kombination von zwei bis sechs Anwendungsfällen entstehen, muss noch untersucht werden. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Ableitung und Bewertung von Anwendungsfällen liegt, wurde die Szenariobildung nur beispielhaft erklärt. Aufgrund der Komplexität jedes einzelnen Anwendungsfalls muss jedoch erstmal eine getrennte eigenständige Untersuchung durchgeführt werden. Im Verlauf der Bearbeitung wurde ein undefinierbar großes Gebiet der Plausibilität sichtbar, welches in weiteren Untersuchungen weitreichender Forschung bedarf. Wird das Szenario gebildet, wird in jeder Schicht geprüft, ob eine Weiterfahrt schichtabhängig überhaupt grundsätzlich möglich ist. Es könnte ein Anwendungsfall vorliegen, wobei gleichzeitig die Weiterfahrt in keinem Fall möglich ist. Somit könnte weder ein automatisiertes System, ein Teleoperator oder ein Mensch vor Ort die Fahraufgabe lösen. Erst wenn die Weiterfahrt grundsätzlich möglich ist, bleibt das Szenario plausibel und wird weiter betrachtet. In jeder Schicht wurden Anwendungsfälle nicht nur identifiziert, sondern auch Interaktionsmöglichkeiten der Teleoperation vorgeschlagen. Für jede Schicht und jeden Anwendungsfall könnten Fragen gestellt werden wie: Ist der Anwendungsfall überhaupt umsetzbar? Dabei müsste zwischen der technischen Umsetzbarkeit auf Fahrzeugseite und Leitstandseite unterschieden werden. Es müsste klar definiert werden welche Informationen der Teleoperator benötigt. Diese Informationen müssten zuverlässig verfügbar und übertragbar sein. Anschließend müsste beurteilt werden, ob der Operator auf der informativen Grundlage eine Entscheidung treffen kann. Ein weiterer Aspekt sind Reaktionszeiten und notwendige Kommunikationsanforderungen. Ein ganzes Untersuchungsthema könnte sein welche Gefährdungen aus der Interaktion entstehen. Man könnte demnach einen Anwendungsfall wählen und für ihn allein eine eigene Untersuchung durchführen. Die schichtabhängige Untersuchung dieser Methodik bildet somit einen geeigneten Ausgangspunkt um den jeweiligen teleoperativen Unterstützungsbedarf zunächst isoliert zu betrachten. Ist ein Anwendungsfall validiert könnten zusätzliche Anforderungen und Wechselwirkungen bei einem Zusammenwirken untersucht werden.

6.3 Diskussion der Risikobewertung

Die Bewertung der Anwendungsfälle erfolgte mit Hilfe eines angepassten Risikographen. Der Risikograph führt mehrere Sicherheitsrelevante Einflussgrößen systematisch zusammen. Es wurde eine eigene Anpassung impliziert, die direkt für teleoperationsrelevante Anwendungsfälle zugeschnitten ist. Die Klassifizierung ist somit ein Teil der Methodik und ist

weder eine ASIL Bestimmung nach der ISO26262 noch eine SIL-Bestimmung nach der IEC 61508. Die Bewertung erfolgte durch drei selbst definierte Kriterien. Diese drei Kriterien sind die Beherrschbarkeit, das Schadensausmaß und die Wahrscheinlichkeit des teleoperativen Bedarfs.

Die Beherrschbarkeit bewertet, in welchem Umfang die teleoperative Aufgabe unter den gegebenen Randbedingungen erfolgreich gelöst werden kann. Es werden andere Verkehrsteilnehmer, Umweltbedingungen und infrastrukturelle Begebenheiten einbezogen. Der Teleoperator wurde nicht mit einbezogen und muss in folgenden Untersuchungen beachtet werden. Je nach Erfahrung des Operators könnten unterschiedliche Szenarien unterschiedlich gut beherrscht werden. Es muss zudem klargestellt werden, welche Rolle die Ausstattung des Leitstandes und die zur Verfügung stehenden Informationen haben. Innerhalb eines Versuches des Teleoperator Arbeitsplatzes der Westsächsischen Hochschule Zwickau könnte eine empirische Untersuchung über den Einfluss der Teleoperationserfahrung durchgeführt werden.

Das Schadensausmaß ordnet das Ausmaß des Schadens bei einer fehlerhaft durchgeführten Teleoperation ein. Zwei Faktoren bestimmen die Größe des Schadensausmaßes. Es wird zum einen die Geschwindigkeit des EGO- Fahrzeuges und der potenzielle Kollisionspartner einbezogen. Ausschlaggebend ist jedoch das der Kollisionspartner aus dem Anwendungsfall hervorgehen muss. Wird im Anwendungsfall kein weiteres dynamisches Element genannt, wird auch keine Kollision mit einem dynamischen Element als Folge einer fehlerhaften Teleoperation angenommen. Die Geschwindigkeit gilt für die teleoperative Weiterfahrt. Es wird kein Bezug zum Stillstand des Fahrzeugs hergestellt. Es wird davon ausgegangen, dass es eigenständig in einem risikominimalen Zustand übergegangen ist.

Die letzte Kategorie bewertet die Wahrscheinlichkeit, dass im vorliegenden Anwendungsfall real eine Teleoperation notwendig ist. Die Wahrscheinlichkeit beschreibt das Verhältnis aus der Anzahl der Anwendungsfälle mit tatsächlichen Teleoperationsbedarf und der Gesamtzahl des Auftretens des jeweiligen Anwendungsfalls. Es wird damit unmittelbar die Relevanz der Teleoperation bewertet. Zudem wird nicht angenommen, dass ein Anwendungsfall für jedes automatisierte System unlösbar ist. Bei den Werten handelt es sich nicht um empirisch nachgewiesene Wahrscheinlichkeiten. Es handelt sich stattdessen um qualitative Abschätzungen. Reale Fahrdaten, Ausfallberichte automatisierter Systeme und Simulationen könnten die Annahmen validieren.

Die SIL-Stufe ist das Ergebnis der sicherheitsbezogenen Klassifizierung. Es wird demnach eine Sicherheitsanforderungsstufe zugeordnet. Es kann nicht direkt daraus geschlossen werden, wie gefährlich ein Anwendungsfall ist. Das höchste Schadensausmaß kann schließlich dennoch mit SIL 1 bewertet werden, wenn mit der besten Beherrschbarkeit und kleinsten Wahrscheinlichkeit gerechnet wird. Obwohl die Anwendungsfälle und ihre Ursachen sehr verschieden sein könnten, ermöglicht die SIL-Klassifizierung einen Vergleich. Es ist möglich, dass ein Anwendungsfall mit kein SIL eingestuft wird. Demnach wird keine SIL-Anforderung gestellt. Der Anwendungsfall kann dennoch ein gewisses Risiko besitzen. Ein Anwendungsfall kann relevant für eine Teleoperation sein und dennoch unter der Schwelle einer SIL- Stufe liegen. Die Teleoperationsrelevanz entspricht demnach nicht der SIL-Relevanz. Die SIL- Stufe wird eindeutig aus den drei Parametern B, S und W gebildet. Diese Parameter sind jedoch qualitative Einschätzungen. Wird ein Parameter anders bewertet, kann eine andere SIL-Stufe daraus folgen. Als Klassifizierung ist die SIL-Stufe somit kein Nachweis über die Sicherheitsintegrität. Um genaue Aussagen über die Sicherheitsintegrität zu treffen, müssen weitere technische und sicherheitsbezogene Untersuchungen durchgeführt werden.

6.4 Grenzen und Übertragbarkeit der entwickelten Methodik

Die entwickelte Methodik wurde auf den Betrachtungsraum der Autobahn angewendet, da die PEGASUS Methodik selbst für diesen Betrachtungsraum konzipiert ist. Mit dieser Begrenzung wurde die Variabilität der Randbedingungen reduziert. Es sollte zunächst erstmal die grundsätzliche Funktionalität des Ablaufs überprüft werden. Die identifizierten Anwendungsfälle und deren Bewertung kann sich in anderen Betrachtungsräumen deutlich verändern. Alle identifizierten Anwendungsfälle und deren Bewertung gelten somit innerhalb der Methodik nur für den gewählten Betrachtungsraum. In folgenden Schritten muss nachgewiesen werden, dass die Methodik auch auf andere Betrachtungsräume anwendbar ist. Die Methodik könnte demnach an einem komplexen innerstädtischen Verkehrsknotenpunkt angewendet werden. Der Albertplatz in Dresden Neustadt wäre eine Option. Mehrere relevante Straßenachsen, wie die Albertstraße, Bautzner Straße und Königsstraße treffen aufeinander. Es sind Verkehrsteilnehmer in jeder Art vorhanden. Dazu gehören PKW, LKW, Lieferverkehr, Straßenbahnen, Radverkehr und Fußgänger. In diesem Anwendungsbereich könnte die Auswahl des Betrachtungsraum detaillierter spezifiziert werden. Der Knotenpunkt könnten in einem Raster aufgeteilt werden. In jedem Teil des Rasters könnten die

Elemente notiert werden, welche in Bezug der jeweiligen Schicht vorkommen. Es könnten dafür Satelliten- und Google-Street-View Aufnahmen verwendet werden. Diese Erfassung der Umgebungsdaten könnte in Zukunft automatisiert durchgeführt werden. Veralterte Daten könnten jedoch die Vollständigkeit beeinflussen. Eine weitere Option wäre den Knotenpunkt vor Ort zu untersuchen. Anhand der aufgenommenen Daten könnten die Hauptereignisse und Unterereignisse abgeleitet werden, welche schließlich den Anwendungsfall definieren und auslösen. Innerhalb der Methodik wurde keine technische Realisierbarkeit nachgewiesen. Es werden Anwendungsfälle identifiziert, eine teleoperative Interaktion vorgeschlagen und eine Risikoeinstufungen durchgeführt. Es müsste nachgewiesen werden, dass eine spezifische Interaktion in Verbindung eines definierten Leitstands und Fahrzeugs sicher durchgeführt werden kann.

6.5 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Aus der experimentellen Untersuchung geht hervor, dass die Qualität der visuellen Informationsbereitstellung mit zunehmender optischer Beeinträchtigung deutlich abnimmt. Es werden nicht alle betrachteten Informationen gleichermaßen beeinträchtigt. Das Vorhandensein eines Signals kann auch in der maximalen Beeinträchtigung, in Abhängigkeit des Kamerasystems noch teilweise wahrgenommen werden. Die zuverlässige Erkennbarkeit spezifischer Merkmale, wie der Farbgebung und der genauen Kennziffer, nimmt schon bei einer geringen Beeinträchtigung zunehmend ab. Dieses Ergebnis ist für die Teleoperation von sehr großer Bedeutung, da das bloße Erkennen eines Objektes nicht zwangsläufig ausreicht, um daraus die notwendigen handlungsrelevanten Informationen zuverlässig zu erfassen.

Die höhere native Sensorauflösung von Kamera 2 hat keinen direkten Einfluss auf die Ergebnisse, da die Aufnahmen in beiden Konfigurationen mit einer festen Auflösung von 1920x1080 Pixeln bereitgestellt wurden. Die Ergebnisse sind somit als Vergleich unter identischen Ausgabebedingungen zu interpretieren.

Kamera 2 erwies sich ohne eine Sichtbeeinträchtigung in der Erkennbarkeit des Signals und der Kennziffer als überlegen. Eine zunehmende optische Beeinträchtigung kehrte dieses Verhältnis um. Ab einer Beeinträchtigung von zwei Folien erwies sich Kamera 1 in allen Kategorien als überlegen. Kamera 1 stellt auch bei größeren Beeinträchtigungen deutlichere Konturen und Kontraste zur Verfügung. Im Gegensatz dazu weist Kamera 2 eine starke Aufhellung und einen erheblichen Verlust des Kontrastes auf. Die genaue technische

Ursache kann innerhalb dieser Untersuchung nicht eindeutig identifiziert werden. Zu den möglichen Einflussgrößen gehören beispielsweise die Optik, die Belichtungsregelung und die Fokussierung.

Aus der Untersuchung geht hervor, dass trotz identischer Versuchsbedingungen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Kamerasystemen auftreten. Auf den ersten Blick wirkt die Kamera 2 in Hinsicht der technischen Daten überlegen. In der Gesamtwertung hat die Kamera 1 mit deutlichem Abstand die bessere visuelle Informationsbereitstellung ermöglicht. Welches Kamerasystem tatsächlich in Abhängigkeit der teleoperativen Bedingungen überlegen ist, muss somit real in einem experimentellen Versuch untersucht werden. Das Zusammenwirken des gesamten Kamerasystems entscheidet über die Qualität der visuellen Informationsbereitstellung.

7 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Identifikation und Bewertung von Anwendungsfällen für die Teleoperation automatisierter Verkehrssysteme. Auf Grundlage bestehender Ansätze wurde eine Methodik entwickelt, die potenzielle Anwendungsfälle ausgehend von auslösenden Ereignissen identifiziert, plausibilisiert und anschließend bewertet. In Ergänzung der Methodik wurde ein erweitertes Teleoperationssystem aufgebaut und in einem experimentellen Versuch Einflussgrößen untersucht.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit wird durch das entwickelte Identifikationsschema dargestellt. Der Ausgangspunkt bildet ein definierter Zustand des automatisierten Systems, in dem eine teleoperative Unterstützung notwendig werden kann. Diesem Endereignis werden übergeordnete Ereignisgruppen und anschließend konkrete auslösende Ereignisse zugeordnet. Für die Ableitung und Beschreibung der Anwendungsfälle wird die Betrachtungsrichtung daraufhin umgekehrt. Es resultiert der reale zeitliche Verlauf vom auslösenden Ereignis, zum übergeordneten Ereignis, bis zum resultierenden Endzustand, in dem ein Unterstützungsbedarf dargestellt ist. Die Einbindung des PEGASUS- Schichtenmodells ermöglichte eine Strukturierung des Verkehrsraums in unterschiedlichen Bereichen.

Aus der Bewertung geht eine Priorisierung der identifizierten Anwendungsfälle hervor. Es wird nicht vorausgesetzt, dass jeder identifizierte Anwendungsfall zwangsläufig bei jedem Auftreten einen teleoperativen Eingriff erfordert. Es wird eine Wahrscheinlichkeit berücksichtigt, mit der aus einem Ereignis ein entsprechender Unterstützungsbedarf resultiert. Aus den Ergebnissen der Bewertung geht hervor, dass insbesondere Ereignisse in Abhängigkeit dynamischer Elemente und Umgebungsbedingungen eine hohe Risikobewertung erzeugen. Es resultiert die Annahme, dass insbesondere veränderliche und begrenzt vorhersehbare Einflüsse eine große Bedeutung für potenzielle Teleoperationsanwendungsfälle besitzen.

In Ergänzung der methodischen Betrachtung wurde ein funktionsfähiges Teleoperationssystem gebaut. Dieses System wurde im Verlauf dieser Arbeit technisch erweitert. Es wird die teleoperative Steuerung des Versuchsfahrzeugs und die Bereitstellung visueller Umgebungsinformationen über zwei Kamerasysteme ermöglicht. Der Demonstrator diente der Untersuchung des Einflusses einer optischen Sichtbeeinträchtigung auf die visuelle Informationsbereitstellung. Definierte Blenden erzeugten eine reproduzierbare Beeinträchtigung.

Es wurde die Erkennbarkeit eines Geschwindigkeitssignals, dessen Farbgebung und die dargestellte Information in Form der Kennziffer bewertet. Es wurde eine deutliche Abnahme der Erkennbarkeit mit steigender Beeinträchtigung gezeigt. Es wurden die Unterschiede bei den Kamerasystemen festgestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methodik zunächst auf einen allgemeinen Betrachtungsraum angewendet. In fortlaufenden wissenschaftlichen Arbeiten könnte die Übertragbarkeit auf einen spezifischen Betrachtungsraum untersucht werden. In eine erweiterte Betrachtung könnte ein konkretes automatisiertes System definiert werden. Experten- und Betriebsdaten könnten die Anwendungsfälle überprüfen und präzisieren. Das entwickelte Teleoperationssystem könnte als Grundlage weiterer experimenteller Untersuchungen dienen. Die definierten Beeinträchtigungen der visuellen Informationsbereitstellung könnten mit definierten Fahraufgaben und Probanden kombiniert werden. Es könnte die Wahrnehmungs-, Entscheidungs- und Handlungsfähigkeit des Bedieners untersucht werden. Es könnten anschließend weitere Einflussgrößen, wie die Kommunikationsverbindung und der daraus resultierenden Beeinträchtigungen durch die auftretende Latenz betrachtet werden. Das Zusammenwirken des Kamerasystems, der Kommunikation, des Bedieners und daraus resultierende Effekte könnten die wesentlichen Einflussbereiche für eine erfolgreiche Teleoperation untersuchen.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, dass potenzielle Anwendungsfälle für eine Teleoperation, anhand einer strukturierten Betrachtung der Verkehrsumgebung und auslösenden Ereignissen systematisch identifiziert und bewertet werden können. Parallel zeigt die experimentelle Untersuchung, dass insbesondere die Qualität der für den Bediener verfügbaren Informationen eine wesentliche Randbedingung für eine erfolgreiche Teleoperation darstellt. Die entwickelte Methodik und das Teleoperationssystem schaffen die Grundlage für weiterführende systematische und experimentelle Untersuchungen.

8 Literaturverzeichnis

Amazon. 2026. innomaker Raspberry Pi Kamera Modul 5MP 1080P OV5647 Sensor mit M12 FOV90 IR Filter Objektiv für Raspberry Pi 5,4,3B+,3,2,B+,A,ZeroW . [Online] 2026. [Zitat vom: 16. 8 2026.] https://www.amazon.de/InnoMaker-Raspberry-Camera-Module-OV5647/dp/B07G9VLPZH?source=ps-sl-shoppingads-lpcontext&ref_=fplfs&smid=A3LR51RN935ZZX&th=1.

Bagschik, G., et al. 2017. *Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen*. Braunschweig, Germany : Technische Universität Braunschweig, 2017.

Baybutt, Paul. 2006. *An Improved Risk Graph Approach for Determination of Safety Integrity Levels (SILs)*. Wiley : InterScience, 2006. <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/prs.10172?>.

Bock, Julian, et al. 2019. *A framework for definition of logical scenarios for safety assurance of automated driving*. [https://www.researchgate.net/figure/Six-layer-model-for-scenarios-Bock-et-al-2018-reprinted-with-permission_fig1_334978903] 2019.

Czarnecki, Krzysztof. 2018 . *Operational Design Domain for Automated Driving Systems Taxonomy of Basic Terms* . Waterloo : University of Waterloo , 2018 .

GOMES, LEE. 2016. WHEN WILL GOOGLE'S SELF' DRIVING CAR REALLY BE READY? *IEEE SPECTRUM - FOR THE TECHNOLOGY INSIDER*. 2016.

GrandViewResearch. 2026. Grand View Research. [Online] 2026. [Zitat vom: 4. 5 2026.] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/autonomous-vehicles-market>.

Hamburg, Institut für Unfallanalysen. 2026. AIS. [Online] 2026. [Zitat vom: 15. 06 2026.] https://unfallanalyse.hamburg/?page_id=398.

IAEA. 1998. *Root Cause Analysis Following an Event at a Nuclear Installation: Reference Manual*. s.l. : IAEA TECDOC SERIES , 1998.

ISO21448. 2022. *ISO 21448:2022*. 2022.

ISO26262-1. 2018. *ISO26262-1*. 2018.

Kalra, Nidhi und Paddock, Susan M. 2016. *Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability?* RAND Corporation, 1776 Main Street, Santa Monica, CA 90401, United States : Transportation Research Part A, 2016.

KE-CONSULT, Kurte & Esser GBR. 2018. *Autonomes Fahren - Aktueller Stand, Potentiale und Auswirkungsanalyse*. Köln : April, 2018.

- Leveson, Nancy G. und Thomas, John P. 2018.** *STPA HANDBOOK* . 2018.
- Mendiboure, Leo, et al. 2023.** *Operational Design Domain for Automated Driving Systems: Taxonomy Definition and Application*. s.l. : IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2023.
- Menzel, Till, Bagschik, Gerrit und Maurer, Markus. 2018** . *Scenarios for Development, Test and Validation of Automated Vehicles* . Braunschweig, Germany : Technische Universität Braunschweig, 2018 .
- MIENYE, IBOMOIYE DOMOR, et al. 2024.** *A Survey of Decision Trees: Concepts, Algorithms, and Applications* . Department of Information Technology, Walter Sisulu University, Buffalo City Campus, East London 5200, South Africa : s.n., 2024.
- Oppermann und Stender-Vorwachs. 2020.** *Autonomes Fahren - Technische Grundlagen, Rechtsprobleme, Rechtsfolgen* . Leibnitz Universität Hannover : C.H.Beck , 2020.
- PEGASUS. 2019.** *PEGASUS METHOD* . 2019.
- PEGASUS-0. 2019.** *PEGASUS-Methode-Schritt-0*. 2019.
- PEGASUS-1. 2019.** *PEGASUS-Methode-Schritt-1*. 2019.
- PEGASUS-2. 2019.** *PEGASUS-Methode-Schritt-2*. 2019.
- PEGASUS-3. 2019.** *PEGASUS-Methode-Schritt-3*. 2019.
- PEGASUS-4. 2019.** *PEGASUS-Methode-Schritt-4*. 2019.
- PEGASUS-9. 2019.** *PEGASUS-Methode-Schritt-9*. 2019.
- R. Nait-Said, F. Zidani and N. Ouzraoui. 2008.** *Fuzzy Risk Graph Model for Determining Safety Integrity Level* . s.l. : Hindawi Publishing Corporation, 2008.
- RaspberryPiLtd. 2024.** *Raspberry Pi Camera Module 3*. 2024.
- Rivera-Lopez, Rafael und Juana Canul-Reich, Elfren Mezura-Montes, Marco Antonio Cruz-Charvez. 2022.** *Induction of decision trees as classification models through metaheuristics* . s.l. : Swarm and Evolutionary Computation , 2022.
- SAE_International. 2021.** *SAEJ3016 - (R) Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 2021.
- Staatskanzlei, Sächsische. 2026.** Sachsen will Tempo beim autonomen Fahren im ÖPNV – Voraussetzungen schaffen für Regelbetrieb bis 2030. [Online] 23. 04 2026. [Zitat vom: 27. 04 2025.] <https://www.medienservice.sachsen.de/medien/news/1096676>.
- Sunnyday. 2026.** Sunnyday mit EDU. [Online] 2026. [Zitat vom: 2. 4 2026.] <http://sunnyday.mit.edu/>.
- Thomas, John, Placke, Seth und Suo, Dajiang. 2015.** *Integration of Multiple Active Safety Systems using STPA*. s.l. : MIT, 2015.

Ulbrich, S., et al. 2015. *Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren* . 2015.

Wittman, David, Wang, Cheng und Lienkamp, Markus. 2015. *Definition and identification of system boundaries of highly automated driving* . 2015.

yworks. 2026. yworks. [Online] 2026. [Zitat vom: 24. 07 2026.]
<https://www.yworks.com/products/yed>.

9 Anhang

Anhang A – Gesamttabelle Teleoperationsanwendungsfälle

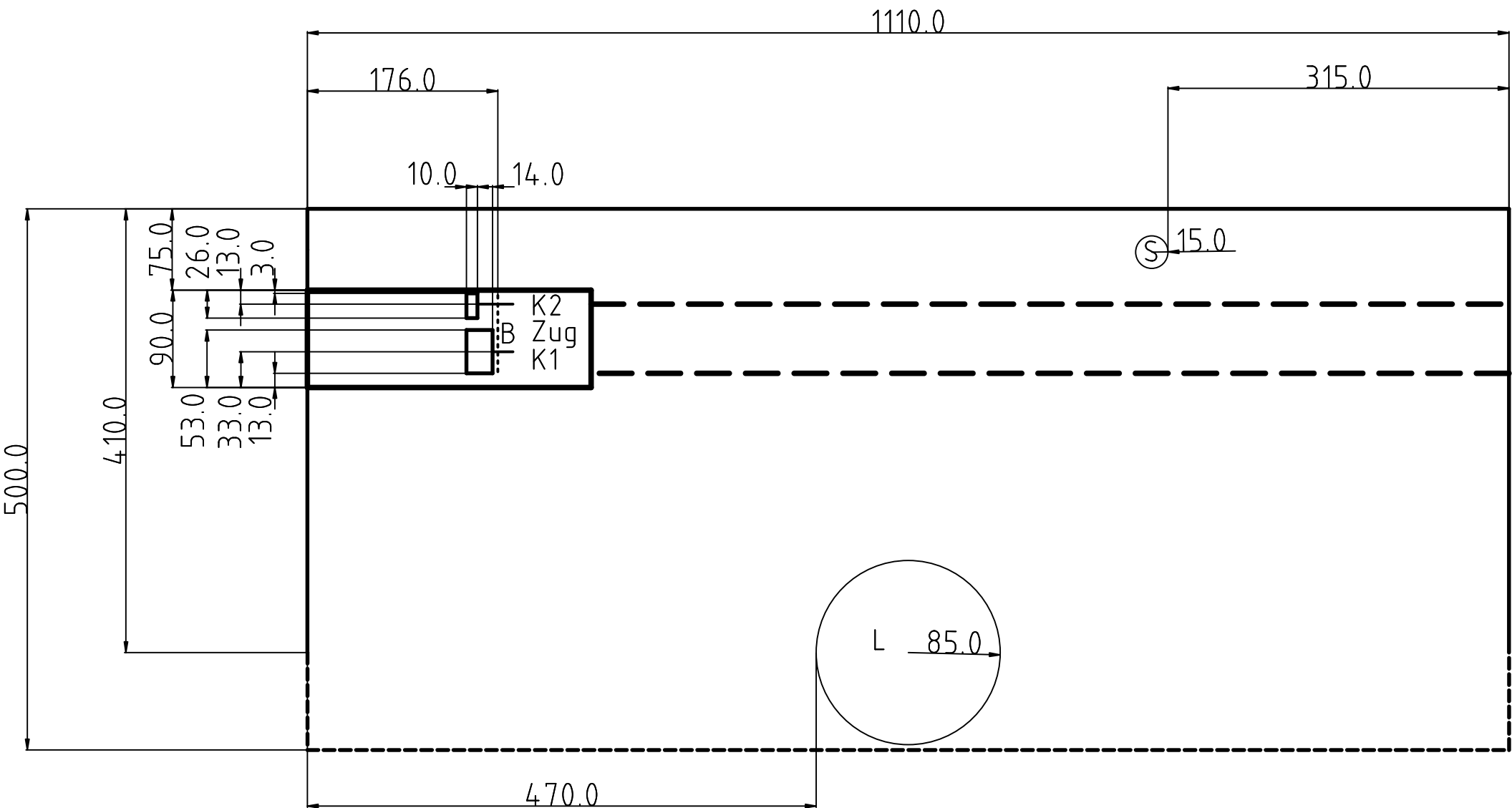
Anhang B – Versuchsumgebung

Anhang C – Quellcode Teleoperationsinterface

Anhang A: Gesamttabelle Teleoperationsanwendungsfälle

PEGASUS-Schicht:	Unterereignis:	Hauptereignis:	Endereignis:	Interaktion:	Betriebsmodus:	Bewertung:
1 - Straßenebene	Risse	Fahrbahn- oberfläche unzureichend	Fahrzeug Stillstand	Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
2 - Straßenebene	Löcher			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
3 - Straßenebene	Spurrinnen			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	kein SIL
4 - Straßenebene	Fahrbahnbreite	Fahrbahn- geometrie unzureichend	Fahrzeug Stillstand	Querführung	direkte Teleoperation	
5 - Straßenebene	Kurvenradius			Querführung	direkte Teleoperation	
6 - Straßenebene	Einfädelung Länge			Querführung	direkte Teleoperation	SIL 3
7 - Straßenebene	Reifenspuren	Fahrbahn- oberfläche bedeckt	Fahrzeug Stillstand	Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
8 - Straßenebene	Schnee			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
9 - Straßenebene	verlorene Fracht			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
10 - Infrastruktur	Leitpfosten beschädigt	Fahrbahn Begrenzung unzureichend	Fahrzeug Stillstand	Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
11 - Infrastruktur	Leitplanke beschädigt			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
12 - Infrastruktur	Markierung beschädigt			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	SIL1
13 - Infrastruktur	Lichtsignal defekt	Verkehrsregel beeinträchtigt	Fahrzeug Stillstand	Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
14 - Infrastruktur	Schild beschädigt			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
15 - Infrastruktur	Polizeimaßnahme			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
16 - Infrastruktur	Tunnel	Beleuchtung beschädigt	Fahrzeug Stillstand	Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	SIL 2
17 - Infrastruktur	Grenzübergang			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
18 - Infrastruktur	Mautanlage			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
19 - temp. Modifikation	Fahrweg mehrdeutig	Durchfahrt Baustelle beeinträchtigt	Fahrzeug Stillstand	Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	SIL 3
20 - temp. Modifikation	Fahrweg blockiert			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
21 - temp. Modifikation	Spurwechsel erford.			Querführung	direkte Teleoperation	
22 - temp. Modifikation	verlorene Ladung	Hinderniss auf der Fahrbahn	Fahrzeug Stillstand	Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
23 - temp. Modifikation	Vegetation			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
24 - temp. Modifikation	Tiere			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	SIL 1
25 - temp. Modifikation	Stauende	Verkehrsstörung	Fahrzeug Stillstand	Längsführung	direkte Teleoperation	
26 - temp. Modifikation	Pannenfahrzeug			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
27 - temp. Modifikation	Unfallstelle			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
28 - dyn. Elemente	Überbreites Fahrzeug	Passieren aufgrund Fahrzeug Abmess- ungen beeinträchtigt	Fahrzeug Stillstand	Querführung	direkte Teleoperation	Sil 3
29 - dyn. Elemente	Überlanges Fahrzeug			Querführung	direkte Teleoperation	
30 - dyn. Elemente	Ladungsüberstand			Querführung	direkte Teleoperation	
31 - dyn. Elemente	Schwertransport	Passieren aufgrund Fahrzeuganzahl beeinträchtigt	Fahrzeug Stillstand	Querführung	direkte Teleoperation	
32 - dyn. Elemente	Ziviler Konvoi			Querführung	direkte Teleoperation	
33 - dyn. Elemente	Militärkolonne			Querführung	direkte Teleoperation	
34 - dyn. Elemente	Fahrzeug rechts versetzt	Passieren aufgrund Spurhaltung beeinträchtigt	Fahrzeug Stillstand	Querführung	direkte Teleoperation	
35 - dyn. Elemente	Fahrzeug links versetzt			Querführung	direkte Teleoperation	
36 - dyn. Elemente	Fahrzeug auf Mittelstreifen			Querführung	direkte Teleoperation	SIL 4

37 - Umweltbedingungen	Nasse Fahrbahn	Traktion beeinträchtigt	Fahrzeug Stillstand	Längsführung	direkte Teleoperation	
38 - Umweltbedingungen	Eisdecke			Längsführung	direkte Teleoperation	SIL 4
39 - Umweltbedingungen	Schneedecke			Längsführung	direkte Teleoperation	
40 - Umweltbedingungen	Nebel	Sichtfeld eingeschränkt	Fahrzeug Stillstand	Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	SIL 4
41 - Umweltbedingungen	Rauch			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
42 - Umweltbedingungen	Sand			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
43 - Umweltbedingungen	Regenfall	Sichtfeld eingeschränkt	Fahrzeug Stillstand	Umfeldererkennung	direkte Teleoperation	
44 - Umweltbedingungen	Schneefall			Umfeldererkennung	direkte Teleoperation	
45 - Umweltbedingungen	Hagelfall			Umfeldererkennung	direkte Teleoperation	
46 - digitale Informationen	Geometrie Abweichung	Kartendaten- fehlerhaft	Fahrzeug Stillstand	Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
47 - digitale Informationen	Fahrweg Abweichung			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	SIL 1
48 - digitale Informationen	Geschwindigkeit Abweichung			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
49 - digitale Informationen	Signal ausgefallen	GNSS- Informationen fehlerhaft	Fahrzeug Stillstand	Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	SIL 3
50 - digitale Informationen	Signal gestört			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
51 - digitale Informationen	Position ungenau			Umfeldererkennung	indirekte Teleoperation	
52 - digitale Informationen	Route nicht verfügbar	Navigationsdaten fehlerhaft	Fahrzeug Stillstand	Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	
53 - digitale Informationen	Route fehlerhaft			Entscheidungsfindung	indirekte Teleoperation	



Anhang C: Quellcode Teleoperationsinterface

~\Desktop\Telezug158.py

```
1  import subprocess
2  import time
3  import os
4  import threading
5  import asyncio
6  import signal
7  import sys
8  import cv2
9  from libcamera import controls
10
11  import bleak
12  from bleak import BleakScanner
13  bleak.discover = BleakScanner.discover
14
15  from flask import Flask, Response, request, jsonify
16  from pylgbst.hub import MoveHub
17  from pylgbst import get_connection_bleak
18
19  from picamera2 import Picamera2
20  import numpy as np
21
22  try:
23      import INA219
24  except Exception as e:
25      print("Raspi Batteriemodul offline:")
26      INA219 = None
27
28  HUB_MAC = "9C:9A:C0:34:2B:6C"
29
30  hub = None
31  conn = None
32  motor = None
33  speed = 0
34  direction = 0
```

```
35 hub_battery_percent = None
36 connecting = False
37 hub_visible = False
38 desired_speed = 0.0
39 desired_direction = 0
40 last_power = None
41 shutting_down = False
42 cleanup_done = False
43 battery_shutdown_requested = False
44
45 def connect_lego():
46     global hub, conn, motor, connecting, last_power
47
48     if connecting:
49         return False
50
51     connecting = True
52
53     try:
54         print("Verbindung zu LEGO ZUG...")
55         conn = get_connection_bleak(hub_mac=HUB_MAC)
56         hub = MoveHub(conn)
57         time.sleep(2)
58         motor = hub.motor_A
59         last_power = None
60
61         if getattr(hub, "voltage", None) is not None:
62             try:
63                 hub.voltage.subscribe(hub_voltage_callback)
64                 print("Hub-Batteriestatus aktiv")
65             except Exception as e:
66                 print("Hub-Batteriestatus inaktiv", e)
67
68         print("LEGO Zug verbunden")
69         return True
70
71     except Exception as e:
```

```

72     print("LEGO Zug nicht verbunden:", e)
73     hub = None
74     conn = None
75     motor = None
76     last_power = None
77     return False
78
79
80 finally:
81     connecting = False
82
83 def hub_voltage_callback(value):
84     global hub_battery_percent
85     try:
86         voltage = float(value)
87
88         min_v = 7.2
89
90         max_v = 9.0
91
92         percent = int((voltage - min_v) / (max_v - min_v) * 100)
93         percent = max(0, min(100, percent))
94
95         hub_battery_percent = percent
96
97         print(f"Hub Spannung:{voltage:.2f} V -> {hub_battery_percent} %")
98
99     except Exception as e:
100         print("Fehler im Hub-Akku-Rückruf:", e)
101
102 def hub_is_visible():
103     try:
104         devices = asyncio.run(BleakScanner.discover(timeout=3.0))
105         for d in devices:
106             if d.address and d.address.upper() == HUB_MAC.upper():
107                 return True
108     return False

```

```
109     except Exception as e:
110         print("Fehler beim Bluetooth-Scan:", e)
111         return False
112
113 app = Flask(__name__)
114
115 def auto_connect_loop():
116     global motor, hub, conn, connecting
117     global desired_speed, desired_direction, last_power, shutting_down
118
119     while True:
120         try:
121             if shutting_down:
122                 time.sleep(0.2)
123                 continue
124
125             if motor is None and not connecting:
126                 print("Suche nach LEGO Hub...")
127
128                 if hub_is_visible():
129                     print("LEGO Hub gefunden, verbinde...")
130                     connect_lego()
131                 else:
132                     print("LEGO Hub noch nicht sichtbar.")
133
134             if motor is not None:
135                 target_power = desired_direction * desired_speed
136
137                 if last_power != target_power:
138                     print("Setze Motorleistung auf:", target_power)
139                     motor.power(target_power)
140                     last_power = target_power
141
142         except Exception as e:
143             print("Fehler im Auto-Connect / Motor-Worker:", e)
144             motor = None
145             hub = None
```

```
146         conn = None
147         connecting = False
148         last_power = None
149
150         time.sleep(0.2)
151
152     threading.Thread(target=auto_connect_loop, daemon=True).start()
153
154     def delayed_exit_and_shutdown():
155         time.sleep(2)
156         os.kill(os.getpid(), signal.SIGINT)
157
158     def handle_exit(signum, frame):
159         print(f"Signal {signum} empfangen, beende Telezug sauber...")
160         cleanup_telezug()
161         sys.exit(0)
162
163     signal.signal(signal.SIGINT, handle_exit)
164     signal.signal(signal.SIGTERM, handle_exit)
165
166     # ----- Kamera einrichten -----
167     picam2 = None
168     camera_index = 1
169     camera_lock = threading.Lock()
170
171     def start_camera(index):
172         global picam2, camera_index
173
174         with camera_lock:
175             try:
176                 if picam2 is not None:
177                     picam2.stop()
178                     picam2.close()
179
180                 camera_index = index
181                 picam2 = Picamera2(index)
182
```

```

183         config = picam2.create_video_configuration(
184             main={"size": (1920, 1080), "format": "RGB888"}
185         )
186
187         picam2.configure(config)
188
189         #-----Autofokus PiCam3-----
190         if index == 1:
191             picam2.set_controls({
192                 "AfMode": controls.AfModeEnum.Continuous
193             })
194
195         picam2.start()
196         time.sleep(1)
197
198         print(f"Kamera {index} gestartet")
199
200         return True
201
202     except Exception as e:
203         print(f"Kamera {index} konnte nicht gestartet werden:", e)
204         picam2 = None
205         return False
206
207 start_camera(camera_index)
208
209 # ----- Akku / INA219 -----
210 def get_battery_status():
211     global battery_shutdown_requested
212     if INA219 is None:
213         return {"error": "ina219_not_available"}
214
215     try:
216         data = INA219.read_battery()
217         soc = int(data["soc"])
218
219         if soc < 10 and not battery_shutdown_requested:

```

```

220         print("Warnung: Akku unter 10%! Starte Shutdown...")
221         battery_shutdown_requested = True
222         threading.Thread(
223             target=trigger_safe_shutdown,
224             args=("Akku unter 10%",),
225             daemon=True
226         ).start()
227
228
229         return {
230             "voltage": round(data["voltage"], 2),    # V
231             "current": round(data["current"], 0),    # mA
232             "power": round(data["power"], 2),        # W
233             "soc": soc                               # %
234         }
235     except Exception as e:
236         print("Fehler beim Lesen der Batterie:", e)
237         return {"error": "read_fail"}
238 # ----- Cleaner -----
239 def cleanup_telezug():
240     global motor, hub, conn, picam2, connecting
241     global desired_speed, desired_direction, last_power, hub_visible, shutting_down, cleanup_done
242
243     print("Starte Telezug-Cleanup...")
244
245     if cleanup_done:
246         print("Alles bereits geschlossen")
247         return
248
249     cleanup_done = True
250     shutting_down = True
251
252     try:
253         if motor is not None:
254             try:
255                 motor.power(0)
256                 print("Motor gestoppt")

```

```
257         except Exception as e:
258             print("Motor konnte nicht gestoppt werden:", e)
259     except Exception as e:
260         print("Fehler beim Motor-Cleanup:", e)
261
262     try:
263         if picam2 is not None:
264             picam2.stop()
265             picam2.close()
266             picam2 = None
267             print("Pi-Kamera freigegeben")
268     except Exception as e:
269         print("Fehler beim Kamera-Cleanup:", e)
270
271     try:
272         result = subprocess.run(
273             ["bluetoothctl", "disconnect", HUB_MAC],
274             capture_output=True,
275             text=True,
276             timeout=5
277         )
278         print("bluetoothctl disconnect:", result.stdout.strip(), result.stderr.strip())
279         time.sleep(1)
280         print("Bluetooth-Verbindung getrennt")
281     except Exception as e:
282         print("Fehler beim Bluetooth-Cleanup:", e)
283
284     motor = None
285     hub = None
286     conn = None
287     connecting = False
288     desired_speed = 0.0
289     desired_direction = 0
290     last_power = None
291     hub_visible = False
292
293     print("Telezug-Cleanup beendet")
```

```

294
295 # -----Niedriger Akku Shutdown-----
296
297 def trigger_safe_shutdown(reason="Unbekannt"):
298     global shutting_down
299
300     if shutting_down:
301         print("Shutdown läuft bereits.")
302         return
303
304     print(f"Sicherer Shutdown ausgelöst: {reason}")
305
306     cleanup_telezug()
307
308     threading.Thread(target=delayed_exit_and_shutdown, daemon=True).start()
309     os.system("(sleep 6; sudo /usr/sbin/shutdown -h now) &")
310 # ----- Video -----
311 def gen_frames():
312     while True:
313         if picam2 is None:
314             time.sleep(0.1)
315             continue
316         try:
317             with camera_lock:
318                 if picam2 is None:
319                     continue
320
321                 frame = picam2.capture_array()
322
323                 if frame is None:
324                     continue
325
326                 if camera_index == 1:
327                     frame = cv2.rotate(frame, cv2.ROTATE_90_CLOCKWISE)
328
329                 ret, buffer = cv2.imencode('.jpg', frame, [int(cv2.IMWRITE_JPEG_QUALITY), 90])
330                 if not ret:

```

```

331         continue
332
333         frame = buffer.tobytes()
334         yield (
335             b'--frame\r\n'
336             b'Content-Type: image/jpeg\r\n\r\n' + frame + b'\r\n'
337         )
338     except Exception as e:
339         print("Fehler Pi-Kamera-Frame:", e)
340         time.sleep(0.1)
341
342
343 @app.route('/video_feed')
344 def video_feed():
345     return Response(gen_frames(), mimetype='multipart/x-mixed-replace; boundary=frame')
346
347 # ----- Hauptseite -----
348 @app.route('/')
349 def index():
350     return '''
351     <html>
352     <head>
353         <title>Teleoperation Fahrzeug</title>
354         <style>
355             body {
356                 margin: 0;
357                 padding: 0;
358                 background:#2F4F4F;
359                 color:white;
360                 text-align:center;
361                 font-family:sans-serif;
362             }
363
364             .video-container {
365                 position: fixed;
366                 width: 100vw;      /* gewuenschte Anzeigegroesse */
367                 height: 100vh;

```

```
368     margin: auto;
369     background:#2F4F4F;
370     padding: 0px;
371     border-radius: 6px;
372     z-index: 1;
373     border: 5px solid #000000
374 }
375
376 .video-container img {
377     width: 100%;
378     height: 100%;
379     object-fit: cover;
380     display: block;
381     border-radius: 6px;
382     z-index: 1;
383 }
384
385 .buttons {
386     position: fixed;
387     bottom: 5vh;
388     right: 136px;
389     display: flex;
390     flex-direction: column;
391     align-items: center;
392     gap: 16px;
393     background:#5F9EA0;
394     padding: 12px;
395     border-radius: 6px;
396     z-index: 10;
397     border: 5px solid #000000
398 }
399
400 .buttons button {
401     width: 80px; height: 130px; font-size: 48px; font-weight: bold;
402     border: 3px solid #000000; border-radius: 6px; background: #28a745; color:white;
403     opacity: 0.8;
404 }
```

```
405
406     .buttons button:hover {
407         background:#555; opacity:1;
408     }
409
410     .buttons button.stop-button {
411         background: #dc3545;
412     }
413
414     .buttons button.stop-button:hover {
415         background: #28a745;
416     }
417
418     /* Akkuanzeige oben rechts */
419     #akkuinfo {
420         position: fixed;
421         top: 26px;
422         left: 1%;
423         background: #5F9EA0;
424         padding: 8px 12px;
425         border-radius: 6px;
426         font-size: 22px;
427         color: #0f0;
428         z-index: 10;
429         border: 5px solid #000000;
430     }
431
432     #hubakkuinfo {
433         position: fixed;
434         top: 80px;
435         left: 1%;
436         background: #5F9EA0;
437         padding: 8px 12px;
438         border-radius: 6px;
439         font-size: 22px;
440         color: #0f0;
441         z-index: 10;
```

```
442         border: 5px solid #000000;
443     }
444
445     #speedbox {
446         position: fixed;
447         bottom: 5vh;
448         right: 10px;
449         width: 120px;
450         height: 560px;
451         background: #5F9EA0;
452         border-radius: 6px;
453         padding: 20px 10px;
454         color: white;
455         display: flex;
456         flex-direction: column;
457         align-items: center;
458         justify-content: flex-start;
459         box-sizing: border-box;
460         z-index: 10;
461         border: 5px solid #000000;
462     }
463
464     #speedtitle {
465         font-size: 28px;
466         font-weight: bold;
467         margin-bottom: 10px;
468         text-align: center;
469     }
470
471     #speedtop, #speedbottom {
472         font-size: 18px;
473         font-weight: bold;
474         opacity: 0.9;
475     }
476
477     #speeddisplay {
478         margin-top: 16px;
```

```
479         font-size: 28px;
480         font-weight: bold;
481     }
482
483     #customslider {
484         position: relative;
485         width: 70px;
486         height: 320px;
487         margin: 15px 0;
488         touch-action: none;
489         user-select: none;
490         border: 3px solid #000000;
491         border-radius: 6px;
492         box-sizing: border-box;
493
494     }
495
496     #slidertrack {
497         position: absolute;
498         left: 50%;
499         top: 10%;
500         transform: translateX(-50%);
501         width: 24px;
502         height: 80%;
503         background: #333;
504         border-radius: 12px;
505         border: 3px solid #000000;
506         box-sizing: border-box;
507     }
508
509     #sliderfill {
510         position: absolute;
511         left: 50%;
512         bottom: 10%;
513         transform: translateX(-50%);
514         width: 18px;
515         height: 60%;
```

```
516         background: #87CEFA;
517         border-radius: 8px;
518         box-sizing: border-box;
519     }
520
521     #sliderthumb {
522         position: absolute;
523         left: 50%;
524         bottom: 20%;
525         transform: translateX(-50%);
526         width: 48px;
527         height: 48px;
528         background: #ffffff;
529         border-radius: 50%;
530         border: 3px solid #888;
531         box-sizing: border-box;
532         cursor: pointer;
533     }
534
535     #titel {
536         position: fixed;
537         top: 0px;
538         right: 1%;
539         background: #5F9EA0;
540         color: white;
541         padding: 10px 20px;
542         border-radius: 6px;
543         display: inline-block;
544         z-index: 10;
545         border: 5px solid #000000
546     }
547
548     #viewmodebox {
549         position: fixed;
550         top: 100px;
551         right: 10px;
552         display: flex;
```

```
553         flex-direction: column;
554         gap: 10px;
555         z-index: 20;
556         background: #5F9EA0;
557         padding: 12px;
558         border-radius: 6px;
559         border: 5px solid #000000
560     }
561
562     .buttonrow {
563         display: flex;
564         gap: 10px;
565     }
566
567     #viewmodebox button {
568         padding: 10px 14px;
569         font-size: 16px;
570         border: 3px solid #000000;
571         border-radius: 8px;
572         background: #008B8B;
573         color: white;
574         cursor: pointer;
575     }
576
577     #viewmodebox button:hover {
578         background: #555;
579     }
580
581
582 </style>
583 </head>
584 <body>
585     <h2 id="titel">Telezug Westsächsische Hochschule Zwickau</h2>
586
587     <div id="akkuinfo">Akku: Lade Daten...</div>
588
589     <div id="hubakkuinfo">Hub: Lade Daten...</div>
```

```
590
591 <div id="viewmodebox">
592     <div class="buttonrow">
593         <button onclick="setViewMode('Groß')">Groß</button>
594         <button onclick="setViewMode('Klein')">Klein</button>
595     </div>
596
597     <div class="buttonrow">
598         <button onclick="setCamera(0)">Kamera 1</button>
599         <button onclick="setCamera(1)">Kamera 2</button>
600     </div>
601
602 </div>
603
604 <div id="speedbox">
605     <div id="speedtitle">Speed</div>
606     <div id="speedtop">100%</div>
607
608     <div id="customslider">
609         <div id="slidertrack"></div>
610         <div id="sliderfill"></div>
611         <div id="sliderthumb"></div>
612     </div>
613
614     <div id="speedbottom">0%</div>
615     <div id="speeddisplay"><span id="speedvalue">10</span>%</div>
616 </div>
617
618 <div class="video-container">
619     
620 </div>
621
622 <div class="buttons">
623     <div>
624         <button onclick="send('vor')">↑</button>
625     </div>
626
```

```
627         <div>
628             <button class= "stop-button" onclick="send('stopp')">■</button>
629         </div>
630
631         <div>
632             <button onclick="send('zurueck')">↓</button>
633         </div>
634     </div>
635
636     <script>
637         let currentSpeed = 0;
638         let dragging = false;
639
640         function send(cmd) {
641             fetch('/steuerung?cmd=' + cmd);
642         }
643
644         function updateSpeed(value) {
645             value = Math.max(0, Math.min(50, Math.round(value)));
646             currentSpeed = value;
647
648             document.getElementById('speedvalue').innerText = value;
649
650             const fill = document.getElementById('sliderfill');
651             const thumb = document.getElementById('sliderthumb');
652             const trackPercent = value * 0.8;
653
654             fill.style.height = trackPercent + '%';
655             thumb.style.bottom = `calc(${trackPercent}% + 12px)`;
656
657             const hue = 120 - (value / 100) * 120; // 0%=grün, 100%=rot
658             const color = `hsl(${hue}, 90%, 45%)`
659
660             fill.style.background = color;
661             thumb.style.background = color;
662             thumb.style.borderColor = "#222";
663             document.getElementById('speeddisplay').style.color = color;
```

```
664
665     fetch('/set_speed?value=' + value)
666         .catch(err => console.log("Fehler beim Setzen der Geschwindigkeit:", err));
667 }
668
669 function setSpeedFromPosition(clientY) {
670     const slider = document.getElementById('customslider');
671     const rect = slider.getBoundingClientRect();
672
673     let y = clientY - rect.top;
674     y = Math.max(0, Math.min(rect.height, y));
675
676     let percent = 100 - (y / rect.height) * 100;
677     percent = Math.max(0, Math.min(100, percent));
678
679     updateSpeed(percent);
680 }
681
682 function setViewMode(mode) {
683     const video = document.querySelector('.video-container');
684     if (!video) return;
685
686     if (mode === 'Groß') {
687         video.style.top = '0px';
688         video.style.left = '0px';
689         video.style.width = '100vw';
690         video.style.height = '100vh';
691     }
692
693     if (mode === 'Klein') {
694         video.style.top = '80px';
695         video.style.left = '10px';
696         video.style.width = '82vw';
697         video.style.height = '90vh';
698     }
699 }
700
```

```
701 function setCamera(index) {
702     fetch('/camera?index=' + index)
703         .then(response => response.json())
704         .then(data => {
705             console.log("Aktive Kamera:", data.camera);
706         })
707         .catch(err => {
708             console.log("Fehler beim Kamerawechsel:", err);
709         });
710 }
711
712 document.addEventListener('DOMContentLoaded', function() {
713     const slider = document.getElementById('customslider');
714
715     updateSpeed(currentSpeed);
716
717     slider.addEventListener('mousedown', function(e) {
718         dragging = true;
719         setSpeedFromPosition(e.clientY);
720     });
721
722     document.addEventListener('mousemove', function(e) {
723         if (dragging) {
724             setSpeedFromPosition(e.clientY);
725         }
726     });
727
728     document.addEventListener('mouseup', function() {
729         dragging = false;
730     });
731
732     slider.addEventListener('touchstart', function(e) {
733         dragging = true;
734         setSpeedFromPosition(e.touches[0].clientY);
735         e.preventDefault();
736     }, { passive: false });
737
```

```
738     document.addEventListener('touchmove', function(e) {
739         if (dragging) {
740             setSpeedFromPosition(e.touches[0].clientY);
741             e.preventDefault();
742         }
743     }, { passive: false });
744
745     document.addEventListener('touchend', function() {
746         dragging = false;
747     });
748 });
749
750
751 document.addEventListener('keydown', function(e) {
752     if (e.key === 'ArrowUp') send('vor');
753     if (e.key === 'ArrowDown') send('zurueck');
754     if (e.key === ' ') send('stopp');
755     if (e.key === 'ArrowLeft') updateSpeed(currentSpeed -5);
756     if (e.key === 'ArrowRight') updateSpeed(currentSpeed +5);
757 });
758
759 document.addEventListener('keyup',function(e) {
760     if (e.key === 'ArrowUp' || e.key === 'ArrowDown') send('stopp');
761 });
762
763 // Akku-Status regelmäßig abfragen
764 function updateAkku() {
765     fetch('/akku')
766         .then(response => response.json())
767         .then(data => {
768             const elem = document.getElementById("akkuinfo");
769             if (!elem) return;
770
771             if (data.error) {
772                 elem.innerText = "Steuerung Akku: Sensorfehler";
773                 elem.style.color = "#f00";
774             } else {
```

```

775         const soc = data.soc;
776         let color = "#0f0"; // grün
777         if (soc < 30) color = "#ff0"; // gelb
778         if (soc < 15) color = "#f00"; // rot;
779
780         elem.style.color = color;
781         elem.innerText =
782             `Steuerung Akku: ${soc}% | ${data.voltage} V | ${data.current} mA | ${data.power} W`;
783     }
784 })
785 .catch(err => {
786     const elem = document.getElementById("akkuinfo");
787     if (elem) {
788         elem.innerText = "Steuerung Akku: Kommunikationsfehler";
789         elem.style.color = "#f00";
790     }
791 });
792 }
793
794 function updateHubAkku() {
795     fetch('/hub_akku')
796     .then(response => response.json())
797     .then(data => {
798         const elem = document.getElementById("hubakkuinfo");
799         if (!elem) return;
800
801         if (data.error) {
802             elem.innerText = "Aktorik Akku: keine Daten";
803             elem.style.color = "#fff";
804         } else {
805             const p = data.percent;
806             let color = "#0f0";
807             if (p < 50) color = "#ff0";
808             if (p < 20) color = "#f00";
809
810             elem.style.color = color;
811             elem.innerText = `Aktorik Akku: ${p}%`;

```

```

812         }
813     })
814     .catch(() => {
815         const elem = document.getElementById("hubakkuinfo");
816         if (elem) {
817             elem.innerText = "Aktorik Akku: Kommunikationsfehler";
818             elem.style.color = "#f00";
819         }
820     });
821 }
822
823     setInterval(updateAkku, 60000); // alle 60 Sekunden aktualisieren
824     updateAkku();
825
826     setInterval(updateHubAkku, 60000);
827     updateHubAkku();
828 </script>
829 </body>
830 </html>
831 '''
832 # ----- Steuerung -----
833 @app.route('/steuerung')
834 def steuerung():
835     global direction, desired_direction
836
837     cmd = request.args.get("cmd")
838     print("Steuerbefehl:", cmd)
839
840     if cmd == "vor":
841         direction = 1
842         desired_direction = 1
843     elif cmd == "zurueck":
844         direction = -1
845         desired_direction = -1
846     elif cmd == "stopp":
847         direction = 0
848         desired_direction = 0

```

```

849     else:
850         return "Unbekannter Befehl", 400
851
852     return "ok"
853
854 # -----Geschwindigkeit-----
855 @app.route('/set_speed')
856 def set_speed():
857     global speed, desired_speed
858
859     try:
860         value = int(request.args.get("value", 0))
861         value = max(0, min(100, value))
862         speed = value / 100.0
863         desired_speed = speed
864
865         print("Neue Geschwindigkeit:", speed)
866
867         return jsonify({"status": "ok", "speed": speed})
868     except Exception as e:
869         print("Fehler beim Setzen der Geschwindigkeit:", e)
870         return jsonify({"status": "error"}), 400
871
872 # ----- Steuerung-Akku-Route -----
873 @app.route('/akku')
874 def akku():
875     return jsonify(get_battery_status())
876
877 # ----- Aktorik-Akku-Route -----
878 @app.route('/hub_akku')
879 def hub_akku():
880     if hub_battery_percent is None:
881         return jsonify({"error": "hub_battery_unavailable"})
882     return jsonify({"percent": hub_battery_percent})
883
884 # ----- Kamera umschalten -----
885 @app.route('/camera')

```

```
886 def camera_switch():
887     try:
888         index = int(request.args.get("index", 0))
889
890         if index not in (0, 1):
891             return jsonify({"status": "error", "message": "Ungültige Kamera"}), 400
892
893         if start_camera(index):
894             return jsonify({"status": "ok", "camera": index})
895
896         return jsonify({"status": "error"}), 500
897
898     except Exception as e:
899         return jsonify({"status": "error", "message": str(e)}), 500
900
901 # ----- Server starten -----
902 if __name__ == "__main__":
903     app.run(host='0.0.0.0', port=5000)
904
```