
Entwicklung einer Methodik zur Identifikation von sicheren Orten für Nothaltemanöver fahrerloser Fahrzeuge

Masterthesis Nr. 771/20

Bearbeiter: Fabian Hoppen | 2895035

Betreuer: Moritz Lippert, M. Sc.; Stefan Ackermann, M.Sc.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



FAHRZEUGTECHNIK
TU DARMSTADT

Fabian Hoppen

Matrikelnummer: 2895035

Studiengang: Master Wirtschaftsingenieurwesen - technische Fachrichtung Maschinenbau

Masterthesis Nr. 771/20

Thema: Entwicklung einer Methodik zur Identifikation von sicheren Orten für Nothaltemanöver
fahrerloser Fahrzeuge

Eingereicht: 08. Juni 2020

Technische Universität Darmstadt

Fachgebiet Fahrzeugtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Otto-Berndt-Straße 2

64287 Darmstadt

Veröffentlicht unter CC-BY 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses>

Zusammenfassung

Im Hinblick auf die neuen Megatrends der Vernetzung, der Elektrifizierung, der geteilten Mobilität und der Automatisierung, befindet sich die Automobilindustrie in einem Zeitalter der Neuausrichtung. Grundlegendes Ziel ist die Neugestaltung der zukünftigen Mobilität und das Generieren eines Mehrwerts bezüglich Sicherheit, Komfort und Effizienz des Fahrens einerseits sowie hinsichtlich der Lebensqualität der Menschen andererseits. Vor diesem Hintergrund startete im Jahr 2018 eine Forschungsinitiative unter dem Projektnamen UNICAR*agil*, um ein völlig neuartiges Konzept von automatisierten und vernetzten Elektrofahrzeugen zu entwickeln.

Aus dieser Entwicklung resultieren neben einigen möglichen Vorteilen auch eine Reihe neuartiger Herausforderungen, die zu bewältigen sind. Eine dieser Herausforderungen ist die zum sicheren Betrieb im urbanen Straßenverkehr notwendige Freigabe von fahrerlosen Fahrzeugen. Im Falle einer Überschreitung der Systemgrenzen eines solchen Fahrzeugs besteht die Notwendigkeit, wieder einen sicheren Zustand herbeizuführen. Die Ausführung des sicheren Anhaltens und das damit verbundene Stehenbleiben an einem sicheren Halteort stellt in diesem Kontext eine Möglichkeit dazu dar. Daher liegt das Ziel der vorliegenden Arbeit darin, eine Methodik zur Identifikation von diesen sicheren Orten für Nothaltemanöver zu entwickeln und initial auf eine Referenzstrecke anzuwenden. Als Lösungsansatz wurde dazu ein vierstufiges Vorgehen gewählt.

Ausgehend von einer ausführlichen Literaturrecherche wurde in einem ersten Schritt eine Abgrenzung der Automatisierung, Autonomie und Fahrerlosigkeit vorgenommen. Es wurden relevante Definitionen sowie Begriffe im Kontext der Sicherheit des automatisierten Fahrens erläutert und auf die Problemstellung dieser Arbeit angepasst. Des Weiteren diente der erste Teil der vorliegenden Arbeit dazu, die Literatur im Rahmen des sicheren Anhaltens, auf potenziell sichere Halteorte zu untersuchen und bereits initiale Kriterien daraus abzuleiten. In diesem Zusammenhang wurden zudem Ursachen einer Systemdegradation aufgezeigt und zuletzt eine Arbeitsdefinition für sichere Halteorte entwickelt.

Anhand der Durchführung eines Brainstormings und verschiedener Fehlerbaumanalysen wurden im zweiten Teil weitere Kriterien für Halteorte identifiziert und kategorisiert. Zudem wurden harte Kriterien abgeleitet, welche potenzielle Halteorte als solche ausschließen sowie Kriterien hoher Priorität, deren Einbindung in die durchgeführte HARA für Halteorte im anschließenden Teil erforderlich war.

Im dritten Teil dienten die Kriterien schließlich dazu, potenziell gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen zu entwickeln. Diese wurden innerhalb einer HARA für Halteorte hinsichtlich der drei Risikodimensionen Kontrollierbarkeit, Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere bewertet, um verschiedene Risikolevel zuzuordnen. Darauf aufbauend war im Anschluss eine Aussage über die Sicherheit möglich. In diesem Zusammenhang wurde die ursprüngliche HARA für funktionale Sicherheit nach ISO 26262 auf die Halteortproblematik angepasst. Insbesondere die Risikodimensionen wurden dazu neu definiert und spezifiziert. Unter anderem wurde beispielsweise ein Sichtweitenmodell hinsichtlich der Kontrollierbarkeit durch andere Verkehrsteilnehmer für das Halten in bestimmten Kurvenbereichen entwickelt.

Im vierten Teil wurde die entwickelte Methodik, d.h. die identifizierten gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen auf verschiedene Streckenabschnitte einer Referenzstrecke angewendet. Daraus wurden schließlich sichere Halteorte für die ausgewählten Streckenabschnitte identifiziert und zugleich die Tauglichkeit der Methodik bestätigt.

Die vorliegende Arbeit bietet daher erstmals eine anwendbare Methodik, die dazu dient, sichere Halteorte im urbanen Straßenverkehr anhand bestimmter Kriterien bzw. Merkmale zu identifizieren. Dies ermöglicht das Erreichen eines sicheren Zustands nach Ausführung eines Nothaltemanövers und bietet das Potenzial zur Ableitung eines Algorithmus und Implementierung in fahrerlosen Fahrzeugen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Formelzeichen und Indizes	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung	4
1.3 Methodik des Vorgehens	4
2 Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Automatisierung, Autonomie und Fahrerlosigkeit.....	7
2.1.1 Automatisierungsgrade nach SAE und Fahrerlosigkeit	7
2.1.2 Abgrenzung der Automatisierung zur Autonomie.....	10
2.2 Definitionen im Zusammenhang der Sicherheit	11
2.2.1 Grundlegende Definitionen bezüglich der Sicherheit automatisierter Fahrzeuge	11
2.2.2 Funktionale Sicherheit	20
2.2.3 Verhaltenssicherheit – SOTIF.....	21
2.3 Sichereres Anhalten	22
2.3.1 Der Begriff der Systemdegradation	23
2.3.2 Differenzierung der Begriffe Szene, Situation und Szenario.....	26
2.4 Ableitung initialer Kriterien für Halteorte	31
2.4.1 Sichere und unsichere Zustände aus der Literatur	31
2.4.2 Initiale Kriterien für Halteorte	32
2.5 Zusammenfassende Arbeitsdefinition eines sicheren Halteortes.....	33
3 Identifikation und Kategorisierung von Kriterien für sichere Halteorte.....	36
3.1 Methoden zur Identifikation von Kriterien für Halteorte.....	36
3.1.1 Brainstorming zur Ableitung von Kriterien	36
3.1.2 Fehlerbaumanalyse zur Ableitung von Kriterien	41
3.2 Identifikation harter Kriterien	45
3.3 Identifikation von Kriterien hoher Priorität	47
3.4 Zusammenfassung hinsichtlich der Kriterien von Halteorten.....	48
4 Entwicklung einer Methodik zur Identifikation sicherer Halteorte	50
4.1 Erläuterung der HARA nach ISO 26262	50
4.2 Anpassung der HARA zur Klassifizierung von Halteorten	52
4.3 Definition und Abgrenzung eines gefährlichen Szenarios.....	53
4.4 Definition einer Missionsgefährdung.....	54

4.5	Ableitung potenziell gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen	55
4.6	Dimensionen und Spezifizierungen des Risikos zur Durchführung der HARA.....	59
4.6.1	Definition und Spezifizierung der Kontrollierbarkeit.....	60
4.6.2	Definition und Spezifizierung der Auftretenswahrscheinlichkeit.....	69
4.6.3	Definition und Spezifizierung der Schadensschwere.....	74
4.6.4	Zusammenfassung hinsichtlich der Risikodimensionen der HARA.....	77
4.7	Zuordnung von Rationalen und Bewertung	78
4.8	Definition und Zuordnung eines Risikolevels	80
4.9	Zusammenfassung der entwickelten Methodik.....	82
5	Beispielhafte Anwendung der Methodik auf eine Referenzstrecke.....	83
6	Diskussion der Ergebnisse	90
7	Ausblick	95
Anhang	97
1.	Anhänge der Fehlerbaumanalysen	97
2.	Anhänge zu den Ergebnissen der HARA für Halteorte	101
3.	Anhänge des Sichtweitenmodells: Skizzen und Formelzusammenhänge.....	108
4.	Anhänge zur Anwendung der entwickelten Methodik auf eine Referenzstrecke	114
Literaturverzeichnis	117

Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m	Abstand vom kurveninneren Fahrstreifenrand zum Sichthindernis
b	m	halbe Fahrstreifenbreite bzw. Abstand Augpunkt/Zielpunkt zum Fahrstreifenrand
c	m	Hilfsabstand
d	m	Hilfsabstand
l	m	zurückgelegte Kurvenlänge des Egofahrzeugs – Strecke zwischen Beginn der Kurvenkrümmung und Egofahrzeug
l_{ges}	m	gesamte Kurvenlänge – Strecke zwischen Beginn und Ende der Kurvenkrümmung
l_{rest}	m	restliche Kurvenlänge – Strecke zwischen Folgefahrzeug und Ende der Kurvenkrümmung, zum Zeitpunkt des Sichtbarwerdens des Egofahrzeugs
R	m	Kurvenradius (zur kurveninneren Fahrstreifenmitte)
s_{erf}	m	erforderlicher Anhalteweg
s_{vor}	m	vorhandener Anhalteweg ab Sichtbarwerden des Egofahrzeugs
s_R	m	Reaktionsweg
s_B	m	Bremsweg
x_1	m	Weglänge des Folgefahrzeugs bis zur Kurve – Strecke zwischen nachfolgendem Fahrzeug und Beginn der Kurvenkrümmung
x_2	m	Weglänge des Egofahrzeugs nach der Kurve – Strecke zwischen Ende der Kurvenkrümmung und dem Egofahrzeug

Griechische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
α	°	Hilfswinkel
β	°	Hilfswinkel
γ	°	Hilfswinkel
δ	°	Hilfswinkel
κ	°	Kurvenwinkel
μ	./.	Reibbeiwert

Indizes:

Zeichen	Bezeichnung
B	Bremung
erf	erforderlich
ges	gesamt
kin	kinetisch
R	Reaktion
Reib	Reibung
rest	restlich
vor	vorhanden
1	Bereich vor der Kurve
2	Bereich nach der Kurve

Abkürzungsverzeichnis

A	Auftretenswahrscheinlichkeit
ADS	Automated Driving System
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
C	Controllability
DDT	Dynamic Driving Task
E	Probability of Exposure
FAS	Fahrerassistenzsystem
FTA	Fault-Tree-Analysis
FZD	Fahrzeugtechnik Darmstadt
g.S.	gefährliches Szenario
HARA	Hazard Analysis and Risk Assessment
ISO	Internationale Standardisierungsorganisation
i.V.m	in Verbindung mit
K	Kontrollierbarkeit
Kfz	Kraftfahrzeug
LIDAR	Light/Laser Detection and Ranging
Lkw	Lastkraftwagen
Mg.	Missionsgefährdung
MRC	Minimal Risk Condition
ODD	Operational Design Domain
OEM	Original Equipment Manufacturer
PAS	Publicly Available Specification
Pkw	Personenkraftwagen
QM	Quality Management bzw. Qualitätsmanagement
RADAR	Radio Detection and Ranging
RASSt	Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen
RL	Risikolevel
S	Severity bzw. Schadensschwere
SAE	Society of Automotive Engineers
SOTIF	Safety of the Intended Functionality
StVO	Straßenverkehrsordnung
VT	Verkehrsteilnehmer
VwV	Verwaltungsvorschrift

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Methodisches Vorgehen als Flussdiagramm	6
Abbildung 2-1: Definitionskette der Sicherheit nach ISO 26262-1 ^a	12
Abbildung 2-2: Zusammenhang zwischen sicherem und risiko-minimalem Zustand nach Reschka	18
Abbildung 2-3: Funktionale Fähigkeiten und Anforderungen nach Reschka.....	19
Abbildung 2-4: Beispielhafte Darstellung der Entitäten einer Szenenrepräsentation.....	27
Abbildung 2-5: Beispielhafte Darstellung der Entitäten einer Situationsrepräsentation	29
Abbildung 2-6: Beispielhafte Darstellung eines Szenarios.....	30
Abbildung 3-1: Haupt- und Unterkriterien aus dem Brainstorming	40
Abbildung 3-2: Übersicht zur Fehlerbaumanalyse für Halteorte.....	42
Abbildung 4-1: Einflussgrößen des vorhandenen Anhaltewegs im Sichtweitenmodell.....	64
Abbildung 4-2: <i>Fall 1</i> des Sichtweitenmodells.....	65
Abbildung 4-3: <i>Fall 2</i> des Sichtweitenmodells.....	66
Abbildung 4-4: <i>Fall 3</i> des Sichtweitenmodells.....	66
Abbildung 4-5: Skizze der Kontrollierbarkeitsbereiche anhand der beispielhaften Kurve	68
Abbildung 5-1: Referenzstrecke zur beispielhaften Anwendung der entwickelten Methodik	83
Abbildung 5-2: Geometrische Winkelnäherung der Kurve in Streckenabschnitt 7.....	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht der Automatisierungslevel nach SAE International	9
Tabelle 3-1: Brainstorming-Ergebnisse für mögliche Halteorte und Kriterien	37
Tabelle 3-2: Auf das Straßenlayout bezogene Kriterien als Ergebnis der Fehlerbaumanalysen	45
Tabelle 4-1: ASIL-Zuordnung in Anlehnung an ISO 26262-3	52
Tabelle 4-2: Schematische Darstellung der Kategorien zur Identifikation gefährlicher Szenarien	56
Tabelle 4-3: Kategorisierung der Kontrollierbarkeit	60
Tabelle 4-4: Kontrollierbarkeitsbereiche und Intervalllänge l für <i>Fall 1</i>	68
Tabelle 4-5: Kontrollierbarkeitsbereiche in Abhängigkeit der Intervalllänge	68
Tabelle 4-6: Kategorisierung der Auftretenswahrscheinlichkeit	70
Tabelle 4-7: Auftretenswahrscheinlichkeiten nach Straßenquerschnitt	73
Tabelle 4-8: Kategorisierung der Schadensschwere	74
Tabelle 4-9: Beispiele der Schadensschwere für gefährliche Szenarien nach ISO 26262-3	75
Tabelle 4-10: Zusammenfassende Kategorisierung der Risikodimensionen	78
Tabelle 5-1: Ergebnisse der Anwendung der Methodik auf Streckenabschnitt 1	85
Tabelle 5-2: Ergebnisse der Anwendung der Methodik auf Streckenabschnitt 7	86
Tabelle 5-3: Kontrollierbarkeitsbereiche der Kurve in Abhängigkeit der Intervalllänge l	88

1 Einleitung

Bereits im Jahr 1978 schrieb das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) ein Projekt zur „Demonstration automobiltechnischer Forschungsergebnisse in integrierten Gesamtkonzepten von PKW-Versuchsmodellen“ aus. Als Forschungsnehmer entwickelte ein Konsortium aus vier Universitäten innerhalb dieses Projekts vier betriebsfähige Prototypen. Unter dem Namen „UNI-CAR“ wurde 1981 der erste Prototyp auf der Internationalen Automobil-Ausstellung in Frankfurt am Main präsentiert. Dieser Prototyp adressierte innovative Ideen im Bereich der Sicherheit, der Abgas- und Geräuschemission sowie des Energieverbrauchs und gab damit bereits den Anstoß für heute in der Serienproduktion vorhandene Technologien. Das Projekt diente unter anderem dazu, einen langfristigen Technologievorsprung und damit einen Wettbewerbsvorteil der deutschen Automobilbranche zu erzielen.¹

Mit diesem Anspruch sowie hinsichtlich der neuen Megatrends² des automatisierten Fahrens, der Elektromobilität, der Vernetzung und der geteilten Mobilität, wurde im Februar 2018 erneut eine Forschungsinitiative durch das heutige Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gestartet. Unter dem Projektnamen „UNICAR*agil*“ arbeiten neben der TU Darmstadt insgesamt 15 weitere deutsche Universitäten und Unternehmen mit umfangreichen Expertisen in verschiedenen Bereichen zusammen. Ziel ist die Entwicklung eines völlig neuartigen Konzepts von automatisierten und vernetzten Elektrofahrzeugen. Die Besonderheit liegt in einer skalierbaren und modularen Architektur von Software- und Hardwarekomponenten. Durch den Einsatz zweier verschiedener Fahrplattformen mit integrierten neuartigen Dynamikmodulen sowie verschiedenen Aufbau- und Sensormodulen, bietet das Konzept Einsatzmöglichkeiten für Anwendungen in den Bereichen Logistik, Personentransport und Privatnutzung.³

Dass automatisiertes Fahren bereits möglich ist, beweist beispielsweise die amerikanische Firma Waymo, welche bereits im Februar 2018 über 8 Millionen Testkilometer mit selbstfahrenden Autos bestätigen konnte⁴. Im Gegensatz zu den verwendeten Serienfahrzeugen, welche durch zusätzliche, zur Automatisierung benötigte Komponenten modifiziert wurden, wird beim Projekt UNICAR*agil* eine andere Philosophie verfolgt. Mit einer „disruptive[n] modulare[n] Architektur für *agile* automatisierte Fahrzeugkonzepte“ wird versucht, das automatisierte und elektrische Fahren von Grund auf neu zu gestalten.³

Innerhalb des Projektes wird zur Freigabe bzw. Absicherung des fahrerlosen Betriebs in urbanen Gebieten zudem ein neuartiger, fahraufgabenspezifischer Sicherheitsnachweis verfolgt. Im Falle einer Systemgrenzüberschreitung, d.h. wenn das Anforderungsniveau zum Befahren eines Streckenabschnittes das Fähigkeitsniveau des Fahrzeugs übersteigt, besteht die Notwendigkeit eines sicheren

¹ Breuer, B.; Essers, U.: UNICAR: Forschungs-PKW der HAG (2013), S. 1–2.

² Pfeil, F.: Megatrends und die dritte Revolution (2018), S. 16–27.

³ UNICAR*agil* - Startseite (2020).

⁴ Team Waymo: 5 million self-driven miles (2018).

Anhaltens.⁵ Dies stellt eine Rückfallebene des Systems dar, welche es ermöglicht, z.B. im Fall eines Sensordefekts, eigenständig einen sicheren Zustand herbeizuführen. Dazu ist einerseits die sichere Ausführung eines Nothaltemanövers erforderlich und zum anderen die Auswahl eines sicheren Halteortes entscheidend. Das von diesem Ort ausgehende Risiko darf ein definiertes Grenzkrisiko nicht überschreiten, sodass ein sicherer Zustand besteht.

Die Definition solcher sicheren Halteorte sowie die Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und deren initiale Anwendung sind daher die Ziele dieser Arbeit.

1.1 Motivation

Seit Jahren arbeiten Forschungseinrichtungen sowie Erstausrüster (engl.: original equipment manufacturers – OEMs) und Start-up-Unternehmen an dem gemeinsamen Ziel, die Mobilität der Zukunft zu automatisieren⁶. In Verbindung mit der Elektromobilität soll die Automatisierung dazu dienen, Sicherheit, Komfort und Effizienz des Fahrens einerseits sowie die Lebensqualität der Menschen andererseits mittels neuer Technologien stetig zu verbessern⁷. Bislang existieren auf dem Markt bereits eine Reihe von Fahrerassistenzsystemen (FAS), welche den Fahrer gezielt durch Übernahme von Quer- und Längsführungsaufgaben unterstützen^{8,9}. Der Fahrer muss jedoch ständig aufmerksam sein und die entsprechenden Systeme überwachen, sodass bis heute auf dem Markt kein System existiert, welches für Fahraufgaben nach Level 3 oder höher gemäß SAE-Standard¹⁰ zugelassen ist¹¹.

Die technische Realisierung von Fahrzeugen bezüglich der benötigten Anforderungen des fahrerlosen Betriebs ist bereits möglich, wie Projekte verschiedener Unternehmen in der Vergangenheit unter Beweis stellten^{12,13}. Einer der momentan führenden Hersteller für elektrische Fahrzeuge schreibt diesbezüglich, dass „alle neue Teslas [...] über die notwendige Hardware [verfügen], um in Zukunft einen autonomen Betrieb unter fast allen Umständen zu ermöglichen.“ Problematisch ist jedoch die für die Freigabe von Fahrzeugen ohne menschliche Überwachung notwendige Zuverlässigkeit, welche das Vermögen eines Menschen übersteigen muss.⁸ Wird ein technisches Produkt auf einem Markt angeboten, so ist unter anderem immer ein Nachweis der funktionalen Sicherheit¹⁴, also der korrekten und sicheren Funktion, zu erbringen¹⁵. Die ISO 26262¹⁶ adressiert diesen Aspekt der Sicherheit. Ausgehend von einer Gefahrenanalyse und Risikoanalyse (engl.: Hazard Analysis and Risk Assessment –

⁵ Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures (2018), S. 22–23.

⁶ Process for Self-Aware Automated Vehicles (2017).

⁷ UNICARagil - Projektinformationen (2020).

⁸ Tesla: Autopilot.

⁹ Mercedes-Benz: Mercedes-Benz Intelligent Drive.

¹⁰ SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016), S. 17.

¹¹ Bestehens-/ Versagensgrenzen automatisierter Fahrfunktionen (2020).

¹² Ziegler, J. et al.: Making Bertha Drive - Autonomous Journey (2014), S. 8–20.

¹³ Team Waymo: 5 million self-driven miles (2018).

¹⁴ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018), S. 14.

¹⁵ Wilhelm, U. et al.: Funktionale Sicherheit und ISO 26262 (2015), S. 86.

¹⁶ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

HARA) werden, basierend auf potenziellen Fehlern des elektrischen bzw. elektronischen Systems, Sicherheitsanforderungen abgeleitet. Des Weiteren stellt die Verhaltenssicherheit einen Sicherheitsaspekt bei automatisierten Fahrzeugen dar, damit auch in Abwesenheit von Systemfehlern die Sicherheit der beabsichtigten Funktionalität gewährleistet wird (engl.: Safety of the Intended Functionality – SOTIF)¹⁷. Zuletzt sei noch die operationale Sicherheit erwähnt, welche das sichere Zusammenspiel von Menschen bzw. weiteren Verkehrsteilnehmern mit automatisierten Fahrzeugen beschreibt.¹⁸ Im Kontext dieser ganzheitlich zu betrachtenden Sicherheitsaspekte wird daher im Fall einer Systemgrenzüberschreitung häufig die Einleitung eines sicheren Anhaltenmanövers notwendig, um die Sicherheit zu gewährleisten.

Im Gegensatz zu einem streckenbasierten Sicherheitsnachweis, welcher nach Wachenfeld und Winner je nach Anwendungsfall mehrere Milliarden von Testkilometern erfordert¹⁹, wird im Rahmen von UNICARagil versucht, den Absicherungsaufwand zu reduzieren. Zu Gewährleistung der Sicherheit werden daher einzelne Streckenabschnitte hinsichtlich der Anforderungen zum Befahren kategorisiert und jeder Kategorie benötigte Fahrzeugfähigkeiten zugewiesen. Anschließend erfolgt die Freigabe von Streckenabschnitten nach erfolgreicher Validierung, d.h. nach erfolgreichem Test, ob die Fähigkeiten eines automatisierten Fahrzeugs die Anforderungen eines Streckenabschnitts erfüllen.²⁰

Dennoch besteht die Möglichkeit, dass während einer Fahrt auf einem freigegebenen Streckenabschnitt die Situation auftritt, dass das Fähigkeits- unter das Anforderungsniveau fällt. Dies geschieht auf Grund interner oder externer Ursachen. Im Speziellen bedeutet dies, dass beispielsweise interne technische Fehler des Fahrzeugführungssystems oder des Fahrzeugs selbst zu verringerten funktionalen Fähigkeiten, also einer verschlechterten Leistungsfähigkeit, führen. Im Hinblick externer Ursachen sind z.B. veränderte Umweltbedingungen wie technische Fehler und/oder Unstimmigkeiten bei der Straßenbeschilderungen oder Verkehrsleitsystemen ausschlaggebend für eine Systemdegradation.²¹ Das sichere Anhalten dient innerhalb dieser funktionalen Degradation als letzte mögliche Option, einen sicheren Zustand herzustellen, wenn andere Maßnahmen wie bspw. eine Verringerung der Geschwindigkeit oder eine Vergrößerung der Sicherheitsabstände nicht ausreichend sind²². Durch Einleitung eines Nothaltmanövers im Sinne eines gering dynamischen Fahrmanövers und Stehenbleiben an einem sicheren Ort wird daher versucht, das Betriebsrisiko des fahrerlosen Fahrzeugs innerhalb zu definierender Grenzen zu halten, sodass die Sicherheit gewährleistet wird. Sowohl das sichere Erreichen eines Halteortes als auch die Sicherheit des Ortes selbst sind daher ausschlaggebende Faktoren für einen sicheren Zustand.

Die Motivation dieser Arbeit liegt, auf Grund fehlender vorhandener Ansätze in der Literatur und Forschung, auf der Entwicklung einer Methodik zur Identifikation sicherer Orte für Nothaltmanöver

¹⁷ ISO: ISO/PAS 21448:2019 (2019).

¹⁸ Bagschik, G. et al.: Framework for Safe Automated Vehicles (2018), S. 2438–2439.

¹⁹ Die Freigabe des autonomen Fahrens (2015), S. 454–457.

²⁰ Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures (2018), S. 22–23.

²¹ Reschka, A.; Maurer, M.: Conditions for a safe state (2015), S. 5.

²² Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 189 ff.

fahrerloser Fahrzeuge. Dadurch wird ein Beitrag im Kontext des sicheren Anhaltens geleistet, welcher es ermöglicht, den sicheren Endzustand der Rückfallebene *Sicheres Anhalten* zu definieren.

1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Wie bereits unter 1.1 erwähnt, dient die vorliegende Arbeit im Kontext des Projekts UNICAR^{agil} und der einhergehenden fahraufgabenspezifischen Absicherung von fahrerlosen Fahrzeugen dazu, sichere Orte für Nothaltemanöver zu identifizieren. Bei automatisierten Fahrzeugen des SAE-Levels 4 oder höher werden Personen im Fahrzeug nicht als Rückfallebene akzeptiert²³, falls bspw. systembedingt das vorhandene Fähigkeitsniveau eines Fahrzeugs das Anforderungsniveau eines Streckenabschnitts unterschreitet. Als logische Konsequenz daraus muss ein System eigenständig in der Lage sein, durch eine funktionale Degradation wieder einen sicheren Zustand herbeizuführen. Das sichere Anhalten stellt eine Möglichkeit diesbezüglich dar. In diesem Zusammenhang besteht die Notwendigkeit, dass ein potenzielles Nothaltemanöver entsprechend der vorhandenen Fahrzeugfähigkeiten ausgeführt wird, sodass ein sicherer Zustand während des Haltevorgangs aufrechterhalten wird. Des Weiteren ist das Erreichen eines sicheren Zielstandortes entscheidend. Es besteht das Erfordernis, dass das vom Halteort ausgehende Risiko für alle beteiligten Personen und zu jedem Zeitpunkt in einem zumutbaren Bereich liegt. Zumutbar bezieht sich in diesem Kontext auf gesellschaftlich moralische Aspekte. Daher besteht die Notwendigkeit zur Entwicklung einer Arbeitsdefinition für sichere Halteorte, welche eine Beurteilung der Zumutbarkeit und eine Aussage über die Sicherheit ermöglicht. Auf Grundlage dieser Definition wird anschließend die Entwicklung einer geeigneten Methodik zur Identifikation sicherer Halteorte angestrebt, um schließlich deren Anwendbarkeit und Tauglichkeit anhand verschiedener Streckenabschnitte einer Referenzstrecke zu prüfen. Ebenso sind eine Diskussion der Ergebnisse und eine Erläuterung von Potenzialen sowie das Aufzeigen möglicher weiterer Forschungsgegenstände, im Sinne eines Ausblicks, Teil der Aufgabenstellung.

1.3 Methodik des Vorgehens

Zur Erreichung der oben genannten Ziele wird ein aus vier Schritten bestehendes Vorgehen angewendet. Zu Beginn wird mittels einer ausführlichen Literaturrecherche vorerst eine Abgrenzung der Begriffe *Automatisierung*, *Autonomie* und *Fahrerlosigkeit* durchgeführt, um ein einheitliches Verständnis im Kontext des automatisierten Fahrens zu schaffen. Des Weiteren werden relevante Definitionen und Begriffe im Zusammenhang der Sicherheit erläutert. Ausgehend von einer Allgemeinen Sicherheitsdefinition werden die Begriffe *Risiko*, *Zumutbarkeit*, *Gefährdung*, *risiko-minimaler Zustand* sowie *sicherer Zustand* erläutert und spezifiziert. Anschließend werden für ein ganzheitliches Sicherheitsverständnis die *funktionale Sicherheit*, die *Verhaltenssicherheit* und die *operationale Sicherheit* erläutert. Mit Fokus der Recherche auf dem sicheren Anhalten wird zudem der Begriff der *Systemdegradation* erklärt und potenzielle interne und externe Ursachen einer funktionalen Degradation aufgezeigt. Zudem wird in diesem Kontext eine Differenzierung der Begriffe *Szene*, *Situation* und *Szenario* durchgeführt und anschließend Vorschläge für Halteorte in der Literatur identifiziert

²³ SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016), S. 17.

sowie initiale Kriterien und Merkmale daraus abgeleitet. Als Ergebnis dieser Recherche wird eine zusammenfassende Arbeitsdefinition für einen *sicheren Halteort* erarbeitet, auf die sich das weitere Vorgehen stützt.

Der zweite Arbeitsschritt besteht in der Anwendung zweier Methoden zur Bestimmung weiterer Merkmale, Kriterien und Einflussfaktoren für sichere Halteorte. Dazu werden zwei Verfahren angewendet. Die *Fehlerbaumanalyse* (engl: Fault-Tree-Analysis – FTA) dient ausgehend von einem Fehler bzw. einer unerwünschten Folge zur Ursachenanalyse als Top-down-Vorgehen. Das *Brainstorming* als zweites Verfahren liefert auf Ebene eines Bottom-up-Vorgehens weitere Kriterien durch Identifikation und Bewertung von potenziellen Halteorten. Innerhalb dieses Arbeitsschrittes werden zudem *harte Kriterien* bestimmt, die einen unsicheren Halteort von vornherein ausschließen, sowie *Kriterien hoher Priorität*, deren Betrachtung im dritten Teil der Arbeit erforderlich ist.

Der Hauptteil des Vorgehens richtet sich an die eigentliche Methodik zur Identifikation sicherer Halteorte. Dazu wird in Anlehnung an die Norm ISO 26262²⁴, ausgehend von den Definitionen sowie den Kriterien für Halteorte, eine zweigeteilte *Gefahrenanalyse und Risikobewertung* bzw. *HARA* durchgeführt. Der erste Teil der Analyse und Risikoklassifizierung erfolgt für gefährliche Szenarien. Der zweite Teil der Analyse bezieht sich auf die Gefährdung von (Fahr-)Missionen, ausgehend vom gewählten Halteort des Egofahrzeugs. Zur Durchführbarkeit der HARA im Kontext der Bestimmung sicherer Halteorte ist vorerst eine Erläuterung des Vorgehens dieses Bewertungsverfahrens notwendig. Anschließend werden verschiedene Bestandteile, insbesondere die Risikodimensionen der *Kontrollierbarkeit*, *Auftretenswahrscheinlichkeit* und *Schadensschwere* neu definiert und ausführlich spezifiziert sowie notwendige Begriffe wie *gefährliche Szenarien*, *Missionsgefährdungen* und *Risikolevel* erläutert. Durch Anstellen von Überlegungen, statistischen Begründungen, Modellen und Annahmen, sowie in Anlehnung an bestehende Erklärungen innerhalb der ISO 26262²⁴, werden *Rationale* für gefährliche Szenarien bzw. Missionsgefährdungen innerhalb der einzelnen Risikodimensionen festgelegt und diese bewertet. Darauf erfolgt die Zuordnung eines Risikolevels für jedes Szenario und jede Gefährdung. Schließlich werden für jeden potenziellen Halteort, gemäß seinen Merkmalen, anwendbare Gefahrenszenarien und Missionsgefährdungen identifiziert und dessen Gesamtrisiko festgelegt. Somit ist mit der anfänglichen Definition eines sicheren Halteortes eine Aussage über die Sicherheit möglich.

Abschließend wird die Methodik auf verschiedene Streckenabschnitte einer identifizierten und geeigneten Referenzstrecke angewendet und deren Tauglichkeit geprüft. Die Ergebnisse werden abschließend kritisch diskutiert. Zudem wird ein Ausblick hinsichtlich möglicher Verbesserungen und allgemeinen Potenzialen gegeben und zukünftige Forschungsthemen diesbezüglich aufgezeigt.

²⁴ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

Die Abbildung 1-1 stellt nachfolgend das methodische Vorgehen als Flussdiagramm dar.

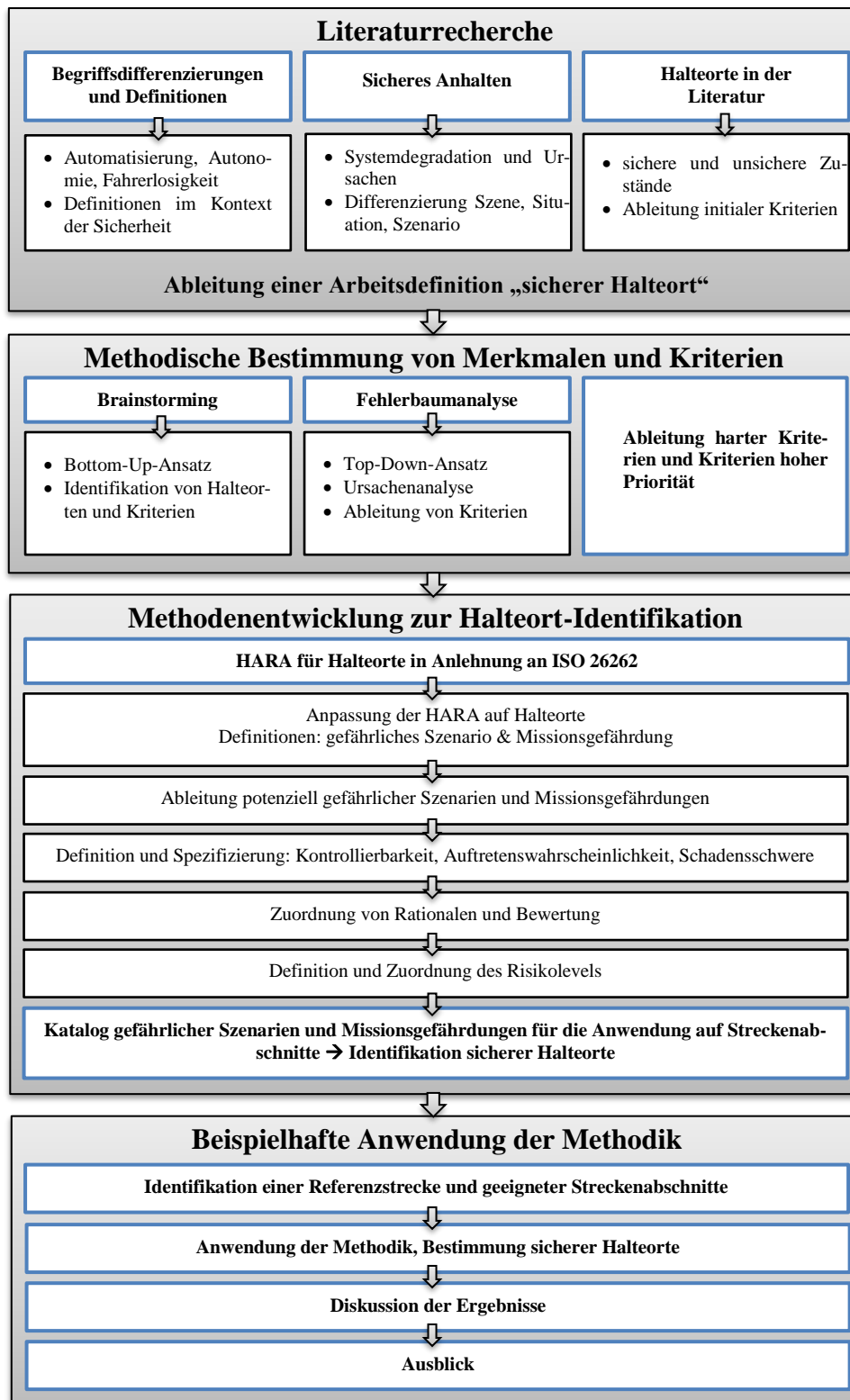


Abbildung 1-1: Methodisches Vorgehen als Flussdiagramm

2 Stand der Forschung und Technik

Im folgenden Teil der Arbeit wird ein allgemeines Verständnis für das automatisierte Fahren und dessen Sicherheitszusammenhang geschaffen. Zunächst werden dazu verschiedene Automatisierungsgrade erklärt sowie der Zusammenhang zur Fahrerlosigkeit aufgezeigt (2.1.1)²⁵ und eine Abgrenzung zur Autonomie vorgenommen (2.1.2).

Anschließend werden für das Sicherheitsverständnis bei automatisierten Fahrzeugen verschiedene Definitionen in diesem Zusammenhang erklärt (2.2). Aufbauend auf den Definitionen für Sicherheit, Risiko, Zumutbarkeit eines Risikos und einer Gefährdung wird ein Bezug zum sicheren und risikominimalen Zustand hergestellt (2.2.1), sodass in Kapitel 2.5 auf dieser Grundlage die Möglichkeit besteht, eine Arbeitsdefinition für einen sicheren Halteort zu entwickeln. Des Weiteren wird auf die funktionale Sicherheit (2.2.2) bei elektrischen bzw. elektronischen Systemen und auf die Verhaltenssicherheit (2.2.3) bei der Automatisierung von Fahrzeugen eingegangen. Im Anschluss daran wird das sichere Anhalten (2.3) als Rückfallebene einer Systemdegradation (2.3.1) erklärt, welches ausgeführt wird, um einen Halteort als sicheren Zustand zu erreichen. In diesem Kontext wird außerdem eine Differenzierung der Begriffe Szene, Situation und Szenario (2.3.2) vorgenommen, welche im Laufe dieser Arbeit an mehreren Stellen benötigt werden.

Im Anschluss daran werden mittels vorhandener Literatur Vorschläge für sichere und unsichere Zustände dargestellt (2.4.1) und bereits initiale Kriterien für die Sicherheit von Halteorten abgeleitet (2.4.2). Dies dient dazu, einerseits den aktuellen Forschungsstand aufzuzeigen und andererseits anhand der Kriterien und gegebenen Definitionen ein besseres Verständnis für die zusammenfassende Arbeitsdefinition eines sicheren Halteortes (2.5) zu schaffen. Diese Definition dient schließlich als Grundlage für das weitere Vorgehen in dieser Arbeit.

2.1 Automatisierung, Autonomie und Fahrerlosigkeit

Das Ziel der Arbeit liegt in der Entwicklung einer Methodik für Nothaltemanöver fahrerloser Fahrzeuge. Daher besteht die Notwendigkeit, zunächst ein Verständnis für den Begriff der Fahrerlosigkeit zu schaffen und diesen im Zusammenhang von Automatisierungsgraden zu erklären (2.1.1) sowie eine Differenzierung zum Begriff der Autonomie vorzunehmen (2.1.2).

2.1.1 Automatisierungsgrade nach SAE²⁶ und Fahrerlosigkeit

Die Society of Automotive Engineers International (SAE International) unterscheidet bei Fahrzeugen sechs verschiedene Automatisierungsgrade.

²⁵ Für ein besseres Verständnis werden in dieser Arbeit in Klammern die referenzierten Kapitel angegeben.

²⁶ SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016), S. 16–25.

Der Automatisierungsgrad wird in der DIN IEC 60050-351^{27a} definiert als

„Anteil der selbsttätigen Funktionen an der Gesamtheit der Funktionen eines Systems oder einer technischen Anlage“^{27b}.

Bezogen auf automatisierte Fahrzeuge bedeutet dies, dass der Anteil der vom System übernommenen Aufgaben, gegenüber den vom Fahrer übernommenen Aufgaben an der gesamten Fahraufgabe, den Automatisierungsgrad bestimmt.

Der in dieser Definition enthaltene Begriff selbsttätig bzw. automatisch wiederum wird definiert als „einen Prozess oder eine Einrichtung bezeichnend, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet“^{27c}.

Je höher also der Anteil der vom System übernommenen selbsttätigen, d.h. ohne menschliches Eingreifen durchgeführten Aufgaben, desto höher ist der Automatisierungsgrad.

In der untersten Automatisierungsstufe, *Level 0: keine Automatisierung*, ist kein eingreifendes Fahrzeugsystem zur Steuerung des Fahrzeugs aktiv. Der Fahrer übernimmt sowohl die Längs- als auch Querführungsaufgaben der Fahrzeugsteuerung.

Bei *Level-1*-Anwendungen *assistiert* das System den Fahrer, d.h. dieser übernimmt entweder die Längs- oder Querführung des Fahrzeugs und das System die jeweils andere Aufgabe. Dies ist beispielsweise bei Fahrzeugen mit einfachem Tempomaten der Fall, welcher die Geschwindigkeit mit geringen Schwankungen um den eingestellten Wert regelt.

In *Level 2* wird eine *Teilautomatisierung* dadurch erreicht, dass das System sowohl Längs- als auch Querführung des Fahrzeugs in spezifischen Anwendungsfällen übernimmt, d.h. unter definierten operationalen Anforderungen²⁸ wie beispielsweise bestimmten Geschwindigkeitsbereichen, Straßenlayouts oder Umfeldbedingungen. Der Fahrer muss jedoch dauerhaft eine Überwachungsfunktion einnehmen, damit jederzeit die Möglichkeit besteht, notwendige Korrekturen oder vollständige Übernahmen ohne Aufforderung auszuführen. Ein Beispiel hierfür stellt das Fahrersassistentensystem „*DISTRONIC-PLUS*“²⁹ von Mercedes-Benz dar, welches sowohl einen Lenk- als auch einen Geschwindigkeitsassistenten beinhaltet und in der Lage ist, unter geeigneten Umständen den Fahrstreifen und den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug entsprechend der Geschwindigkeitsvorgabe durch den Fahrer einzuhalten.

Die *bedingte Automatisierung* in *Level 3* wird dadurch spezifiziert, dass der Fahrer zwar potenziell in der Lage sein muss, die Fahraufgabe zu übernehmen, jedoch ist keine dauerhafte Überwachung erforderlich. Nur im Fall einer Systemgrenzüberschreitung³⁰ muss dieser nach einer definierten Zeit der Übernahmeaufforderung des Systems nachkommen. Zwar existiert beispielsweise mit dem „*Staupi-*

²⁷ DIN: DIN IEC 60050-351 (2014-09-00) (2014). a: -; b: S. 31; c: S. 30.

²⁸ SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016), S. 12.

²⁹ Mercedes-Benz: DISTRONIC-PLUS (2020).

³⁰ Eine Definition des Begriffs Systemgrenzüberschreitung wird in Kapitel 2.3.1 gegeben.

lot[en]“ des aktuellen Audi A8 ein System, welches die Anforderungen für diesen Automatisierungsgrad erfüllt, jedoch fehlt bisher weiterhin die für die Freigabe notwendige Zulassung des Kraftfahrtbundesamtes³¹. Audi hat daher, anders als geplant, das Freigabeziel für die aktuelle Baureihe wieder verworfen³².

In *Level 4*, der *Hochautomatisierung*, ist kein Fahrer erforderlich. Das System ist in spezifischen Anwendungsfällen in der Lage, ohne menschliches Zutun alle Fahraufgaben zu erfüllen und jederzeit selbsttätig den risiko-minimalen Zustand³³ zu erreichen.

Die *vollständige Automatisierung* wird durch *Level 5* erreicht, in welchem ebenfalls kein Fahrer erforderlich ist. Zudem besteht keine Beschränkung durch spezifische Anwendungsfälle. Das System übernimmt alle Fahraufgaben bei allen Straßentypen und in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen und unter verschiedenen Umfeldbedingungen und ist jederzeit in der Lage, den risiko-minimalen Zustand selbsttätig einzunehmen.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass die Einteilung der Automatisierung eines Fahrzeugs in sechs verschiedene Level möglich ist. Die beiden Level der *Hoch- und Vollautomatisierung* sind jeweils dadurch gekennzeichnet, dass kein Fahrer erforderlich ist.

Die nachfolgende Tabelle 2-1 fasst die Einteilung der Automatisierungsgrade nochmals zusammen.

Tabelle 2-1: Übersicht der Automatisierungslevel nach SAE International³⁴

Level	Bezeichnung	Fahrerrolle	Systemrolle
0	keine Fahrautomatisierung	Der Fahrer übernimmt die Längs- <u>und</u> Querführung des Fahrzeugs.	Es ist kein Fahrzeugsystem zur Steuerung der Fahraufgabe aktiv.
1	Fahren mit Assistenzsystemen	Der Fahrer übernimmt die Längs- <u>oder</u> Querführung des Fahrzeugs.	Das System übernimmt jeweils die andere Fahraufgabe, d.h. die gesamte Fahraufgabe wird in Grenzen automatisiert.
2	teilautomatisiertes Fahren	Der Fahrer dient lediglich zur dauerhaften Überwachung des Systems, um jederzeit in der Lage zu sein, Korrekturen oder vollständige Übernahmen auszuführen.	Die Längs- und Querführung des Fahrzeugs werden durch das System in spezifischen Anwendungsfällen (bestimmte Geschwindigkeitsbereiche, Straßenlayouts und Umfeldbedingungen) selbsttätig ausgeführt.
3	bedingt-automatisiertes Fahren	Der Fahrer muss das System zwar nicht dauerhaftüberwachen, jedoch muss er in der Lage sein, im Fall einer Systemgrenzüberschreitung nach definierter Zeit einzugreifen und zu übernehmen.	Die Längs- und Querführung des Fahrzeugs werden durch das System in spezifischen Anwendungsfällen selbsttätig ausgeführt. Bei Systemgrenzüberschreitungen muss eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer abgegeben werden, da nicht aus jeder Ausgangssituation heraus der risiko-minimale Zustand erreicht werden kann.
4	hochautomatisiertes Fahren	Im spezifischen Anwendungsfall ist kein Fahrer erforderlich, welcher das System überwacht und im Fall einer Systemgrenzüberschreitung auf eine Übernahmeaufforderung reagiert und interveniert.	Die Längs- und Querführung des Fahrzeugs werden durch das Systems in spezifischen Anwendungsfällen selbsttätig ausgeführt. Alle Situationen können im spezifischen Anwendungsfall durch das System bewältigt werden, d.h. der risiko-minimale Zustand kann jederzeit selbsttätig erreicht werden.
5	vollautomatisiertes Fahren	Es ist kein Fahrer erforderlich, welcher das System überwacht und im Fall einer Systemgrenzüberschreitung auf eine Übernahmeaufforderung reagiert und interveniert.	Das System übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen, Umfeldbedingungen etc., also zu jedem Zeitpunkt. Es gibt keine Anwendungsfälle, welche das automatisierte Fahrzeug nicht bewältigen kann. Der risiko-minimale Zustand kann jederzeit selbsttätig erreicht werden.

³¹ Spiegel: Audi ist ein Level weiter (2017).

³² Audi ohne "Vorsprung durch Technik" (2020).

³³ Eine Definition des Begriffs risiko-minimaler Zustand wird in Kapitel 2.2.1 gegeben.

³⁴ Eigene Darstellung nach SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016), S. 17.

Im Kontext dieser Arbeit sind *fahrerlose Fahrzeuge* demnach Fahrzeuge des Levels 4 oder 5 nach SAE. Im Fall des Projektes UNICAR*agil* handelt es sich konkret um Fahrzeuge, die in urbanen Gebieten eingesetzt werden und ohne Fahrer konzipiert werden. Da der Anwendungsfall spezifisch ist, entspricht der Automatisierungsgrad Level 4.

2.1.2 Abgrenzung der Automatisierung zur Autonomie

Der Begriff der Autonomie wird nach SAE in der Forschung von Robotik und künstlicher Intelligenz häufig eingesetzt, um die Fähigkeit und Autorität von Systemen zu beschreiben, unabhängige und eigenständige Entscheidungen zu treffen. Kommuniziert oder kooperiert ein automatisiertes System jedoch mit weiteren Entitäten, so sollte nach SAE der Begriff der Autonomie eher durch den Begriff der Kooperation ersetzt werden, da für wichtige Funktionalitäten häufig Informationen von außerhalb des Systems akquiriert und gesammelt werden, wodurch die Unabhängigkeit verloren geht.³⁵

Je nach Region bzw. Land wird der Begriff Autonomie bei automatisierten Level-5-Fahrzeugen oder sogar bei allen automatisierten Fahrzeugen des Levels 3 oder höher verwendet.³⁵

In der Rechtsprechung wird für Autonomie zudem eine Selbstverwaltung vorausgesetzt. Diese ist jedoch bei automatisierten Fahrzeugen, auch bei hochintelligenten Systemen, korrekterweise auf Algorithmen oder Kommandos des Benutzers zurückzuführen, sodass in diesem Fall keine tatsächliche Selbstverwaltung vorliegt.³⁵

Nach Ansicht von Reschka³⁶ wird Autonomie dadurch begründet, dass

„ein autonomes Steuerungsgerät [...] in der Lage [ist], seine Aufgabe ohne menschlichen Eingriff und ohne menschliche Überwachung zu erledigen. Der Lösungsweg ist dem System nicht fest einprogrammiert. Das System passt sich an seine Einsatzbedingungen an, agiert mit seinem Umfeld [(Kooperation)] und reagiert auf sein Umfeld. Es ist adaptiv.“

Sowohl die Rechtsprechung, als auch die Definition nach Reschka setzen für die Autonomie eine Selbstverwaltung voraus. Diese begründet sich nach Reschka durch die Erfüllung einer Aufgabe durch das System ohne menschlichen Eingriff. Der Unterschied beider Definitionen liegt jedoch darin, dass programmierte Algorithmen in der Rechtsprechung nicht als selbstverwaltend angesehen werden, wohingegen Reschka eine Selbstverwaltung eben dadurch begründet, dass kein fester Lösungsweg vorhanden ist und das System selbstständig, wenn auch unter Zuhilfenahme von Algorithmen, zu einer Entscheidung kommt. Reschka argumentiert, dass jedes Fahrzeug mit einem hohen Automatisierungsgrad, das ohne menschliche Überwachung am Straßenverkehr teilnehmen soll, ein autonom handelndes Steuerungsgerät benötigt, welches eigenständig handelt und sich an Veränderungen der Umwelt, des Gesamtsystems oder an veränderte übergeordnete Ziele, anpasst. Im Gegensatz zur Ansicht der SAE wird zudem die Kooperation bzw. das Agieren des Systems mit seinem

³⁵ SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016), S. 26.

³⁶ Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 27 f.

Umfeld als Bestandteil der Autonomie betrachtet und macht es nicht erforderlich, den Begriff Autonomie durch Kooperation zu ersetzen.

Beide Ansichten scheinen vertretbar, weshalb eine Differenzierung zwischen Automatisierung und Autonomie je nach Betrachtungswinkel zu unterschiedlichem Ergebnis führt. Aus diesem Grund werden für den nachfolgenden Teil der Arbeit die Begriffe der Fahrerlosigkeit und der Automatisierung verwendet, um mögliche Missverständnisse zu vermeiden.

2.2 Definitionen im Zusammenhang der Sicherheit

In diesem Kapitel werden Begriffe im Zusammenhang der Sicherheit erläutert. Zunächst wird von einer allgemeinen Definition der Sicherheit ausgegangen, um anschließend mittels der Definitionen für ein Risiko und dessen Zumutbarkeit auf einen sicheren Zustand zu schließen und eine Differenzierung zum risiko-minimalen Zustand vorzunehmen (2.2.1). Des Weiteren wird die Definition einer Gefährdung erläutert (2.2.1), welche insbesondere im Kontext der in der Arbeit durchgeführten Gefahrenanalyse und Risikobewertung (4.5 – 4.8) relevant wird. Zuletzt wird die funktionale Sicherheit (2.2.2) und die Verhaltenssicherheit (2.2.3) erläutert, da diese bei der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge wichtige Aspekte hinsichtlich der ganzheitlichen Sicherheitsbetrachtung darstellen.

2.2.1 Grundlegende Definitionen bezüglich der Sicherheit automatisierter Fahrzeuge

Die ISO 26262³⁷ adressiert das Thema funktionale Sicherheit im Kontext elektrischer/elektronischer Systeme von Kraftfahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr. Dazu wird der Begriff der Sicherheit im ersten Teil der Norm (ISO 26262-1^{38a}) definiert als

„absence of unreasonable risk“^{38b}.

An einer anderen Stelle der Norm wird das unzumutbare Risiko definiert als

„risk [...] judged to be unacceptable in a certain context according to valid societal moral concepts“^{38c}

und das Risiko selbst als

„combination of the probability of occurrence of harm [...] and the severity [...] of that harm“^{38d}.

Die Definition eines Schadens (engl.: harm) wiederum lautet wie folgt:

„Physical injury or damage to the health of persons“^{38e}.

Wird dieses Vorgehen fortgeführt, so ergibt sich nach einigen Definitionen und verschiedenen Verweisen innerhalb der Norm die nicht taxative Definitionskette gemäß Abbildung 2-1, welche auf Grund der Detailtiefe auf der Elementebene eines Systems abgebrochen wurde. Der interessierte Leser wird daher auf die Norm selbst verwiesen, da im nachfolgenden Teil der Arbeit nur genauer auf

³⁷ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

³⁸ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018). a: -; b: S. 21; c: S. 26; d: S. 21; e: S. 15.

die relevanten Definitionen der Sicherheit, der Gefährdung, des angemessenen Risikos und des sicheren sowie des risiko-minimalen Zustands eingegangen wird.

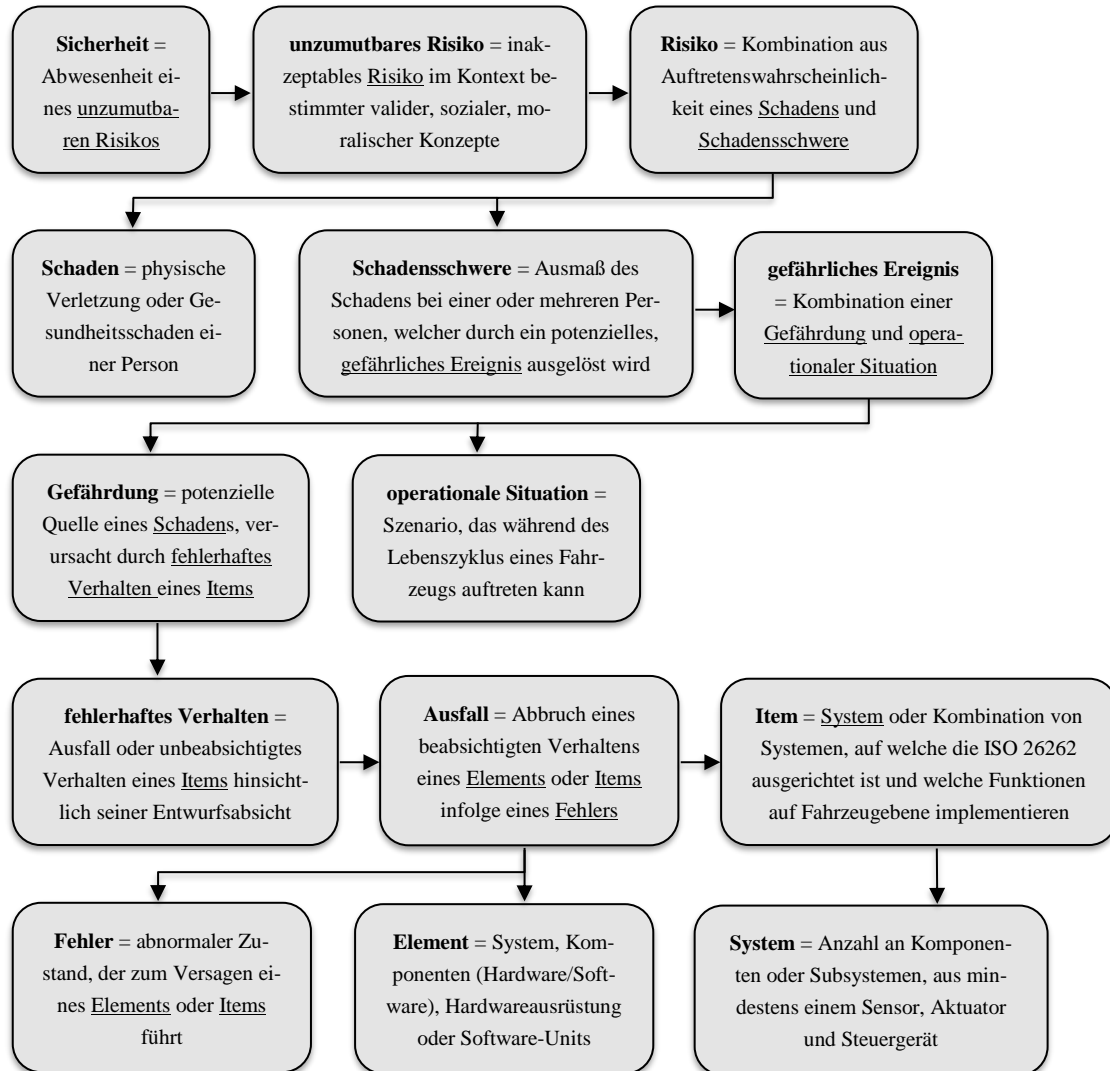


Abbildung 2-1: Definitionskette der Sicherheit nach ISO 26262-1^{39a}

Sicherheit (engl.: safety)

Die Definition der Sicherheit nach ISO 26262-1^{39b} als Zustand der Abwesenheit eines unzumutbaren Risikos, wird beispielsweise von Reschka⁴⁰ näher erläutert. Die Sicherheit bestimmt sich demnach durch den Zustand eines technischen Systems in einer Situation⁴¹, in welchem kein unzumutbares Risiko für das System selbst oder dessen Umwelt besteht. Sicherheit ist zudem relativ, d.h. von der

³⁹ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018). a: -; b: S. 21.

⁴⁰ Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 52 f.

⁴¹ Eine Definition des Begriffs Situation wird in Kapitel 2.3.2 gegeben.

individuellen Perspektive einer Person abhängig. Sofern das zumutbare Risiko in einer Situation aus Sicht jeder betroffenen Person eingehalten wird, besteht Sicherheit.

Eine weitere gebräuchliche Definition liefert das Rechtschreibwörterbuch „DUDEN“, welches die Sicherheit unter anderem definiert als

„höchstmögliches Freisein von Gefährdungen“⁴².

Im Kontext dieser Arbeit wird der Sicherheitsbegriff als

Abwesenheit eines unzumutbaren Risikos hinsichtlich aller beteiligter Personen

verwendet. Risiko und Zumutbarkeit werden nachfolgend erläutert.

Risiko (engl.: risk)

Ein Risiko definiert sich nach ISO 26262-1^{43a} aus der Kombination der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadens und der Schadensschwere^{43b}. Die Schadensschwere wiederum bezieht sich nur auf Personenschäden, d.h. auf physische Verletzungen oder gesundheitliche Schäden einer Person^{43c}. Die Auftretenswahrscheinlichkeit ist nach Reschka⁴⁴ ein Maß für die Häufigkeit des Eintretens einer Situation, durch welche die Gefahr eines Personenschadens besteht. Die Schwere ist eine Schätzung für das Ausmaß des Schadens, durch ein gefährliches Ereignis^{43d}. Ein Risiko ist nach Reschka⁴⁴ zudem situationsabhängig.

Im Kontext dieser Arbeit definiert sich ein Risiko, bzw. genauer ausgedrückt ein Risikolevel⁴⁵ aus *Kombination der*

- *Auftretenswahrscheinlichkeit*⁴⁶,
- *Schadensschwere*⁴⁷ und
- *Kontrollierbarkeit*⁴⁸

eines gefährlichen Szenarios oder einer Missionsgefährdung.

Die Spezifizierung dieser drei Dimensionen erfolgt in Kapitel 4.5 ausführlich und geschieht in Anlehnung an die ISO 26262⁴⁹. Nach Zuordnung von Rationalen werden für jede Dimension verschiedene Kategorisierungen in Form von Zahlenwerten bestimmt, sodass deren Kombinationen Risikolevel definieren. Schadensschwere und Auftretenswahrscheinlichkeit beziehen sich in dieser Arbeit, im Gegensatz zu Reschkas Definition⁴⁴, nicht ausschließlich auf Personenschäden. Stattdessen wer-

⁴² DUDEN: Sicherheit (2020).

⁴³ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018). a: -; b: S. 21; c: S. 15; d: S. 24.

⁴⁴ Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 53.

⁴⁵ Eine Definition des Begriffs Risikolevel wird in Kapitel 4.8 gegeben.

⁴⁶ Eine Definition des Begriffs Auftretenswahrscheinlichkeit wird in Kapitel 4.6.2 gegeben.

⁴⁷ Eine Definition des Begriffs Schadensschwere wird in Kapitel 4.6.3 gegeben.

⁴⁸ Eine Definition des Begriffs Kontrollierbarkeit wird in Kapitel 4.6.1 gegeben.

⁴⁹ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

den zusätzlich die Wahrscheinlichkeit und Schwere von Missionsgefährdungen ohne Personenschäden bewertet, sodass sich die bereits erwähnte Zweiteilung der HARA ergibt⁵⁰. Das Risiko ist innerhalb eines Szenarios⁵¹ aus Perspektive der beteiligten Personen ebenfalls situationsanhängig.

Zumutbarkeit eines Risikos (engl.: reasonable risk)

Im Kontext der am Straßenverkehr teilnehmenden Fahrzeuge gibt es keine absolute Sicherheit. Sicherheit ist, wie bereits zuvor erwähnt, ein relatives Maß und von vielen Einflussfaktoren abhängig. Ein Risiko ist daher beim Betrieb von Fahrzeugen immer vorhanden, sodass die Definition eines zumutbaren bzw. vertretbaren Risikos notwendig wird, welches von der Gesellschaft beim Einsatz einer bestimmten Funktionalität eines Systems gerade noch akzeptiert wird.⁵²

Sofern das Risiko innerhalb der Grenzen für Akzeptanz („*absence of unreasonable risk*“^{53a}) hinsichtlich valider, sozialer und moralischer Konzepte („*according to valid societal moral concepts*“^{53b}) liegt, besteht Sicherheit.

Nach Grunwald⁵⁴ ist die gesellschaftliche Akzeptanz einer neuen Technologie stark abhängig vom Verhältnis des Nutzens dieser Technologie zu den Risiken. Durch das automatisierte Fahren beispielsweise besteht die Forderung nach konkreten Vorteilen für die Nutzer, damit bestimmte Risiken akzeptiert werden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das gerade noch akzeptierte Risiko höher ist, je höher der wahrgenommene Nutzen ausfällt. Es besteht die Notwendigkeit, dass Risiken und Nutzen gerecht und nachvollziehbar sind, damit sich eine Akzeptanz einstellt. Dazu ist die Definition eines Risikoniveaus anhand zweckmäßiger Metriken erforderlich, welche sowohl Vor- als auch Nachteile des autonomen Fahrens adressieren.⁵⁴

Die Schwierigkeit besteht demnach in einer geeigneten Quantifizierung des Grenzkrisikos für diese Zumutbarkeit.

Im Kontext von sicheren Halteorten in der vorliegenden Arbeit wird dieses Quantifizierungsproblem vereinfacht angegangen, d.h. ohne Bezug zu möglichen Vorteilen bzw. dem Nutzen einer neuen Technologie. Das bedeutet, dass in Anlehnung an die ISO 26262⁵⁵ eine HARA durchgeführt wird. Durch die bereits erwähnte Kombination aus Auftretenswahrscheinlichkeit, Schadensschwere und Kontrollierbarkeit lassen sich Risikostufen für bestimmte gefährliche Szenarien bzw. Missionsgefährdungen bestimmen. Es wird die Annahme getroffen, dass das *Risiko hinsichtlich valider, sozialer und moralischer Konzepte zumutbar ist, sofern die Klassifizierung des Risikostufen entweder*

- *die niedrigste Ausprägung aufweist (unmögliches Auftreten, kein Schaden/keine Missionsgefährdung oder sehr gute Kontrollierbarkeit), sodass kein Risiko besteht oder*

⁵⁰ Das genaue Vorgehen wird in Kapitel 4.2 erläutert.

⁵¹ Eine Definition des Begriffs Szenario wird in Kapitel 2.3.2 gegeben.

⁵² Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 53.

⁵³ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018). a: S. 21; b: S. 26.

⁵⁴ Grunwald, A.: Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren (2015), S. 680 f.

⁵⁵ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

-
- die Bewertung mit dem QM-Level (Qualitätsmanagement-Level) erfolgt.

Diese Annahme beruht auf folgender Argumentation:

Die ursprüngliche Verwendung der ISO 26262 zielt unter anderem darauf ab, einzelne elektrische bzw. elektronische Komponenten eines Systems hinsichtlich ihrer funktionalen Sicherheit zu bewerten und ggf. Sicherheitsziele abzuleiten. Dies geschieht anhand einer HARA. Durch Zuordnung der ASIL („Automotive Safety Integrity Level“^{56a}) QM, A, B, C und D bei der Risikobewertung eines gefährlichen Ereignisses wird festgelegt, ob die Notwendigkeit besteht, Sicherheitsziele zu definieren. Die Festlegung dieser Sicherheitsziele ist notwendig, um Gefährdungen zu vermeiden oder zu reduzieren, sodass das Risiko zumutbar bleibt^{56b}. Jedoch werden innerhalb der HARA Sicherheitsziele nur für die ASIL A, B, C und D festgelegt. Bei Zuordnung des QM-Levels sind Qualitätsprozesse ausreichend, um das identifizierte Risiko zu managen. Sofern kein ASIL zugeordnet wird, besteht kein Risiko.⁵⁷

Bei Übertragung des Vorgehens auf Halteorte⁵⁸ wird daher die Annahme getroffen, dass gesellschaftliche Akzeptanz besteht und das Risiko somit zumutbar ist, wenn einem Halteort entweder kein Risikolevel oder das QM-Level zugeordnet wird. Nur dann wird im Kontext dieser Arbeit von sicheren Halteorten gesprochen⁵⁹. Erfolgt hingegen die Klassifizierung eines Halteortes mit A, B, C oder D, so ist das Risiko eines Halteortes im Kontext dieser Arbeit nicht zumutbar und der Halteort unsicher.

Die Aspekte des potenziellen Nutzens einer neuen Technologie im Verhältnis zu den Risiken nach Grunwald⁶⁰ werden im Kontext der Risikodefinition in dieser Arbeit vernachlässigt.

Gefährdung (engl.: hazard)

Die Definition einer Gefährdung ist einerseits im Kontext eines gefährlichen Ereignisses der zuvor dargestellten Definitionskette für die Sicherheit relevant, andererseits wird sie im späteren Verlauf der Arbeit bei der Durchführung der HARA in Kapitel 4 benötigt, um ein besseres Verständnis für die Gefahrenanalyse zu schaffen. Nach ISO 26262-1 wird die HARA definiert als

„method to identify and categorize hazardous events [...] of items [...] and to specify safety goals [...] and ASILs [...] related to the prevention or mitigation of the associated hazards [...] in order to avoid unreasonable risk“^{56b}.

Im Sinne dieser Gefahrenanalyse und Risikobewertung geht es also darum, durch Identifikation und Kategorisierung gefährlicher Ereignisse, ausgehend von Systemkomponenten, Sicherheitsziele und ASIL zu definieren, um Gefährdungen auszuschließen oder zu mindern, damit keine unzumutbaren Risiken entstehen.

⁵⁶ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018). a: S. vi; b: S. 15.

⁵⁷ ISO: ISO 26262-3:2018 (2018), S. 8 f.

⁵⁸ Eine detaillierte Erklärung der Übertragung des Vorgehens auf Halteorte erfolgt in Kapitel 4.2.

⁵⁹ Eine Definition des Begriffs sicherer Halteort wird in Kapitel 2.5 gegeben.

⁶⁰ Grunwald, A.: Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren (2015), S. 680 f.

Die ISO 26262-1^{61a} definiert den in dieser Definition enthaltenen Begriff der Gefährdung als potenzielle Quelle eines Schadens, verursacht durch fehlerhaftes Verhalten eines Items^{61b}. Mit fehlerhaftem Verhalten ist der Ausfall oder unbeabsichtigtes Verhalten eines Items hinsichtlich seiner Entwurfsabsicht gemeint^{61c}. Ein Item wiederum stellt ein System oder eine Kombination von Systemen dar, auf welche die ISO 26262 ausgerichtet ist und welche Funktionen auf Fahrzeugebene implementieren^{61c}. Sobald ein System oder eine Kombination aus Systemen im Betrieb eines (automatisierten) Fahrzeugs demnach fehlerhaftes Verhalten aufweisen, d.h. ausfallen oder entgegen der beabsichtigten Funktion handeln, ist ein gefährliches Ereignis möglich. Dadurch übersteigt das Risiko den Wert der Risikoakzeptanz, sodass keine Sicherheit besteht.

Dieser Argumentation folgt auch Reschka^{62a}. Er schreibt, dass

„eine Gefährdung [...] durch ein elektrisches/elektronisches System für Mensch und Umwelt [...] eintritt, wenn in einer Situation ein von diesem System ausgehendes Risiko auf ein höheres Niveau steigt als das Grenzkrisiko.“^{62b}

Im Fall einer Gefährdung ist die Sicherheit also nicht mehr gegeben, da das Risiko nicht mehr vertretbar ist.

Im Kontext dieser Arbeit wird an diese Definition von Reschka^{62a} angeknüpft. Ausgehend von einem elektrischen/elektronischen System, also dem fahrerlosen Fahrzeug als Gesamtsystem, entsteht eine Gefährdung, wenn in einer Situation innerhalb eines Szenarios das vom System ausgehende Risiko größer ist, als das definierte Grenzkrisiko. Das Grenzkrisiko wird am Halteort bestimmt durch das zuvor definierte zumutbare Risiko. Bei Klassifizierung eines Halteortes mit den Risikostufen A, B, C, oder D wird das Grenzkrisiko überschritten und es besteht durch das stehende Fahrzeug eine Gefährdung, die hinreichend groß ist, um in einer bestimmten Situation ein gefährliches Ereignis oder eine Missionsgefährdung herbeizuführen.

Eine Gefährdung im Kontext dieser Arbeit ist daher nicht auf die initiale Ursache einer fehlerhaften Komponente zurückzuführen wie in der Definition nach ISO erläutert wird. Stattdessen bezieht sich eine Gefährdung auf die Ursache der Auswahl eines risikobehafteten Halteortes, welcher infolge der Systemdegradation⁶³ beim sicheren Anhalten eingenommen wurde und zu einer möglichen Kollision bzw. einem Personenschaden führt oder Verkehrsteilnehmer in ihrer Missionserreichung gefährdet. Die Durchführung dieser Systemdegradation wiederum ist unter anderem von fehlerhaftem Verhalten bestimmter elektrischer bzw. elektronischer Komponenten abhängig.

Sicherer Zustand (engl.: safe state)

Der sicherere Zustand wird in der ISO 26262-1^{64a} definiert als

„operating mode [...], in case of a failure [...], of an item [...] without an unreasonable level of risk“^{64b}.

⁶¹ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018). a: -; b: S. 15; c: S. 16.

⁶² Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017). a: -; b: S. 54.

⁶³ Eine Definition des Begriffs Systemdegradation wird in Kapitel 2.3.1 gegeben.

⁶⁴ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018). a: -; b: S. 21; c: S. 10; d: S. 18.

Wenn ein Ausfall (engl.: failure), d.h. ein Abbruch eines beabsichtigten Verhaltens eines Elements oder Items, also ein Systemversagen infolge eines Fehlers vorliegt^{64c}, wird der Betriebsmodus (engl.: operating mode) in den das Fahrzeug dann versetzt wird, als sicher definiert, solange das Risiko für alle beteiligten Personen zumutbar ist. Gemäß der Definition der Zumutbarkeit darf also im Fehlerfall ein bestimmtes Grenzkrisiko, während des dann eingeleiteten Betriebsmodus, nicht überschritten werden.

Ein Betriebsmodus wird definiert als

„conditions of functional state that arise from the use and application of an item [...] or element [...]“^{64d}.

Anders ausgedrückt ist der sichere Zustand ein Zielzustand bei auftretenden technischen Fehlern bzw. Systemgrenzüberschreitungen, d.h. dessen Einleitung ist vom internen Systemzustand abhängig. Sowohl für die Insassen als auch andere Verkehrsteilnehmer besteht das Erfordernis, das zumutbare Risiko einzuhalten.⁶⁵ Fraglich ist jedoch, wie die Darstellung eines sicheren Zustands gelingt.

Isermann schreibt dazu in seinem Buch^{66a}:

„For automobiles, (usually) a safe state is stand still (or low speed) at a nonhazardous place.“^{66b}

Auf Grund der Komplexität automatisierter Fahrzeuge und des ständig vorhandenen Risikos einer Systemgrenzüberschreitung müssen daher zu jedem Zeitpunkt mögliche Anhaltetrajektorien berechnet werden und vorhanden sein⁶⁷, welche es ermöglichen, das Fahrzeugs durch aktives Verhalten an einem sicheren Ort anzuhalten:

„However, if no mechanical back-up exists after failure of electronics, only an action by other electronics (switch to a still operating module) can bring the vehicle (in motion) to a safe state, i.e. to reach a stop through active fail-safe“^{66c}.

Einige Beispiele für sichere Zustände werden in Kapitel 2.4.1 im Zusammenhang von in der Literatur erwähnten Halteorten erläutert.

Die zusammenfassende Definition des sicheren Zustandes nach Reschka als

„Zustand eines automatisierten Fahrzeugs [...] mit zumutbarem Risiko des Betriebs des automatisierten Fahrzeugs für Passagiere und weitere Verkehrsteilnehmer“⁶⁵,

wird im Kontext dieser Arbeit übernommen, jedoch mit der Besonderheit, dass sich der Betrieb auf den Stillstand des automatisierten Fahrzeugs an einem Halteort bezieht. Mit der nachfolgenden Definition des risiko-minimalen Zustands und den vorangegangenen Definitionen des Risikos und dessen Zumutbarkeit ist es im Anschluss daran möglich, den sicheren Zustand auf den Begriff eines sicheren Halteortes zu übertragen (siehe Kapitel 2.5).

⁶⁵ Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 54.

⁶⁶ Isermann, R.: Fault-Diagnosis Systems (2006). a: -; b: S. 352; c: S. 352.

⁶⁷ Siehe hierzu auch Kapitel 2.3 zum Thema sicheres Anhalten.

Risiko-minimaler Zustand (engl.: risk minimal state) und Differenzierung zum sicheren Zustand

Der risiko-minimale Zustand bzw. auch „*minimal risk condition*“^{68a} (MRC), wird nach SAE International folgendermaßen definiert:

„*A condition to which a user or an ADS may bring a vehicle after performing the DDT fallback in order to reduce the risk of a crash when a given trip cannot or should not be completed.*“^{68a}

Ein „*Automated Driving System*“^{68b} (ADS) beschreibt dabei ein automatisiertes Fahrsystem gemäß der in Kapitel 2.1.1 erwähnten Automatisierungsgrade. Kommt es zu einer Systemgrenzüberschreitung, beispielsweise auf Grund eines technischen Fehlers und ist daher die sichere Fortsetzung der Fahrt nicht möglich, so ist ein „*DDT fallback*“^{68c} (Dynamic Driving Task fallback), also die Überführung des Systems in einen risiko-minimalen Zustand notwendig, um einen möglichen Unfall in Folge einer Überschreitung der Fahrzeugfähigkeiten zu vermeiden. Der risiko-minimale Zustand ist daher als Zielzustand einer solchen Zustandsänderung bzw. Systemdegradation anzusehen.

Der risiko-minimale und sichere Zustand sind voneinander zu differenzieren. Während der sichere Zustand bestimmt wird durch das Einhalten eines Grenznrisikos, besteht auch bei Nichteinhaltung des Grenznrisikos eventuell ein risiko-minimaler Zustand. Der risiko-minimale Zustand ist situationsabhängig und ist entweder ein sicherer oder unsicherer Zustand.^{69a}

Abbildung 2-2 zeigt nachfolgend zwei *risiko-minimale Zustände a* und *b* auf einer Achse mit zunehmendem Risiko in x-Richtung. Im *Zustand a* ist der risiko-minimale Zustand zugleich auch sicher, da das Grenznrisiko für alle beteiligten Personen in der zugehörigen Situation eingehalten wird. *Zustand b* hingegen ist unsicher, da das Risiko in der zugehörigen Situation zwar risiko-minimal ist, das Grenznrisiko jedoch überschritten wird.

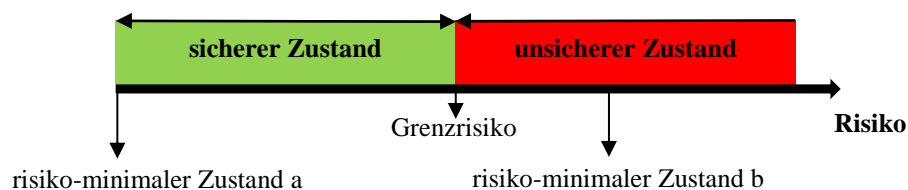


Abbildung 2-2: Zusammenhang zwischen sicherem und risiko-minimalem Zustand nach Reschka⁷⁰

Bezogen auf den Fahrbetrieb ergibt sich eine weitere Definition des risiko-minimalen Zustands. Bei automatisierten Fahrzeugen sind, wie bereits in der Einleitung erwähnt, funktionale Fähigkeiten eines Fahrzeugs und funktionale Anforderungen durch das Befahren eines Streckenabschnitts ausschlaggebend für den sicheren Betrieb. Die Definition einer Fähigkeit lautet dazu wie folgt:

⁶⁸ SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016). a: S. 9; b: S. 3; c: S. 5 f.

⁶⁹ Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017). a: S. 54 ff.; b: S. 67; c: S. 55.

⁷⁰ Eigene Darstellung nach Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 55.

„Eine Fähigkeit [eines technischen Systems] beschreibt die Qualität einer Aktivität, abhängig von systeminternen Eigenschaften und der aktuellen Situation“^{69b}.

Die Fähigkeiten beruhen auf einer Aggregation von Sensordaten des Fahrzeugs und der Umwelt sowie auf Überwachungsdaten der Fahrzeughard- und software. Bei Kombination der Werte und Vergleich mit verschiedenen Modellen und Metriken ist die Erstellung einer Selbstrepräsentation des gesamten Fahrzeugsystems möglich, welche die aktuellen Fähigkeiten repräsentiert.⁷¹

Liegt das Niveau der aktuell vorhandenen funktionalen Fähigkeiten eines Systems im Fahrbetrieb über den funktionalen Anforderungen an das System, so befindet sich das System in einem sicheren Zustand. Übersteigen die Anforderungen jedoch die Fähigkeiten, so ist der Betrieb unsicher. Das Grenzkrisiko wird, im Fall des Fahrbetriebs, definiert durch den Zustand, indem die funktionalen Fähigkeiten den funktionalen Anforderungen entsprechen. Der risiko-minimale Zustand in einer Situation des Fahrbetriebs wird bestimmt durch die maximal mögliche Differenz aus funktionalen Fähigkeiten und funktionalen Anforderungen. Durch Handlungen des Fahrzeugs ist es möglich, den risiko-minimalen Zustand zu beeinflussen.^{69c}

In Abbildung 2-3 wird nachfolgend der Zusammenhang des sicheren/unsicheren Zustands und des Grenzkrisikos von den funktionalen Fähigkeiten und funktionalen Anforderungen während des Fahrbetriebs dargestellt.

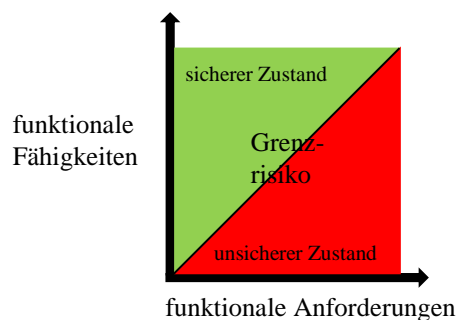


Abbildung 2-3: Funktionale Fähigkeiten und Anforderungen nach Reschka⁷²

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass der risiko-minimale Zustand abhängig ist von der Betriebsart eines automatisierten Fahrzeugs. Befindet sich das Fahrzeug im Fahrbetrieb, so definieren sich der risiko-minimale und sichere Zustand in Abhängigkeit der funktionalen Fähigkeiten und Anforderungen wie zuvor dargestellt. Die maximal mögliche Differenz aus funktionalen Fähigkeiten und funktionalen Anforderungen in einer Situation stellt dann den risiko-minimalen Zustand dar.

Führt ein automatisiertes Fahrzeug jedoch eine Systemdegradation aus und nimmt die Rückfallebene *Sicheres Anhalten*⁷³ ein, so definiert sich der risiko-minimale Zustand durch den Halteort mit dem niedrigsten Risikolevel gemäß der Risikodefinition im Kontext der sicheren Halteorte.

⁷¹ Reschka, A.; Maurer, M.: Conditions for a safe state (2015), S. 4.

⁷² Eigene Darstellung nach Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 56.

⁷³ Eine Definition des Begriffspaares sicheres Anhalten wird in Kapitel 2.3 gegeben.

Da sich die Arbeit mit der Entwicklung einer Methodik zur Identifikation sicherer Halteorte beschäftigt, liegt der Fokus auf der Bestimmung der Risikolevel für Halteorte, um anhand dieser Level sichere und risiko-minimale Zustände bzw. Halteorte zu definieren.

2.2.2 Funktionale Sicherheit

Das Thema Sicherheit bei automatisierten Fahrzeugen lässt sich beispielsweise nach Waymo⁷⁴ differenzieren in die Bereiche funktionale Sicherheit, Verhaltenssicherheit, operationale Sicherheit und in die eher klassischen Gesichtspunkte bei der Fahrzeugentwicklung, Crashesicherheit und Sicherheit hinsichtlich Kollisionsvermeidung.

Die funktionale Sicherheit wird von der Norm ISO 26262⁷⁵ adressiert und ist in dieser definiert als „*absence of unreasonable risk [...] due to hazards [...] caused by malfunctioning behaviour [...] of E/E systems*“⁷⁶.

Die alleinige Abwesenheit eines unzumutbaren Risikos, wie sie bereits bei der Definition der Sicherheit genannt wurde, wird nun um eine Risikoursache bzw. um Gefährdungen ergänzt. Es darf folglich kein unzumutbares Risiko infolge Gefährdungen, welche durch fehlerhaftes Verhalten elektrischer bzw. elektronischer Systeme ausgelöst werden, entstehen.

Auch im Fall von Systemfehlern oder Systemversagen, bzw. bei drohendem Verlassen der Systemgrenzen, besteht die Notwendigkeit, das System in einem sicheren Zustand zu betreiben, damit funktionale Sicherheit besteht⁷⁴. Funktional sichere Systeme müssen auf unerwartete Ereignisse so reagieren, dass eine Gefährdung für Mensch und Umwelt verhindert wird und somit das von einem System ausgehende Risiko in einer Situation das Grenzkrisiko für Zumutbarkeit nicht überschreitet.⁷⁷

Ein automatisiertes Fahrzeug ist daher funktional sicher, wenn es im Fall eines Systemversagens oder einer Systemgrenzüberschreitung in einem sicheren Zustand operiert, indem eine funktionale Degradation⁷⁸ ausgeführt wird. Im Kontext der Arbeit und des sicheren Anhaltens wird dieser sichere Zustand durch einen sicheren Halteort⁷⁹ erreicht.

Durch redundante Systeme in automatisierten Fahrzeugen besteht die Möglichkeit, funktionale Sicherheit zu gewährleisten. Im Fall eines Systemversagens, beispielsweise durch einen Computerdefekt, wird auf die Redundanzen zurückgegriffen, sodass die Leistungsfähigkeit aufrechterhalten wird. In den UNICARagil-Projektfahrzeugen ist beispielsweise die Stammhirn-Hardware (engl.: The Brainstem Hardware) redundant ausgeführt⁸⁰.

⁷⁴ Waymo: Waymo Safety Report (2018), S. 11.

⁷⁵ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

⁷⁶ ISO: ISO 26262-1:2018 (2018), S. 14.

⁷⁷ Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 52 f.

⁷⁸ Eine Definition des Begriffs funktionale Degradation wird in Kapitel 2.3.1 gegeben

⁷⁹ Eine Definition des Begriffs sicherer Halteort wird in Kapitel 2.5 gegeben.

⁸⁰ Keilhoff, D.: UNICARagil – Disruptive Vehicle Concepts Architectures (2019).

2.2.3 Verhaltenssicherheit – SOTIF

Wie zuvor dargestellt, adressiert die funktionale Sicherheit die Vermeidung unzumutbarer Risiken, hervorgerufen durch Gefährdungen, infolge von fehlerhaftem Verhalten. Im Gegensatz dazu bezieht sich die Sicherheit der beabsichtigten Funktion, auch Verhaltenssicherheit⁸¹ oder Gebrauchssicherheit⁸², nach ISO/PAS 21448^{83a} auf die Vermeidung von Risiken infolge von Gefährdungen, die nicht auf Systemversagen beruhen. In anderen Worten ausgedrückt, ist diese Verhaltens- bzw. Gebrauchssicherheit also auf das sichere Verhalten bzw. den sicheren Gebrauch unter normalen Betriebszuständen ausgerichtet.

Die SOTIF⁸⁴ betrachtet Systeme, welche sich auf die Wahrnehmung der externen oder internen Umwelt beziehen. Potenzielle Gefährdungen werden bei diesen Systemen nicht nur durch Ausfälle verursacht, sondern entstehen durch Überschreitung der beabsichtigten Funktionalität bzw. durch die limitierte Leistungsfähigkeit während des Gebrauchs innerhalb der spezifischen Bedingungen⁸⁵, unter denen das automatisierte Fahrzeug eingesetzt wird. Diese Limitationen werden hervorgerufen, durch die Unfähigkeit einer Funktion, eine Situation korrekt wahrzunehmen oder bestehen auf Grund fehlender Robustheit einer Funktion hinsichtlich der Variation von Inputdaten der Sensoren. Verschiedene Umweltbedingungen, bspw. Nebel oder starker Schneefall führen dazu, dass Sensoren gegebenenfalls keine robusten Daten liefern.^{83b}

Die Abkürzung SOTIF (Safety of the Intended Functionality) wird nicht nur stellvertretend für die Normbezeichnung der ISO/PAS 21448^{83a} verwendet, sondern wird zudem in dieser Norm definiert als

„absence of unreasonable risk due to hazards resulting from functional insufficiencies of the intended functionality or from reasonably foreseeable misuse by persons“^{83c}.

Neben den funktionalen Unzulänglichkeiten der beabsichtigten Funktionalitäten wird auch die vorhersehbare unsachgemäße Nutzung eines Systems durch die Verhaltenssicherheit erfasst, wobei dies bei den Fahrzeugen des Projekts UNICARagil auf Grund der Fahrerlosigkeit weniger relevant erscheint.

Um eine ganzheitliche und sicherheitsgerichtete Entwicklung zu erzielen, sind parallel Aspekte der funktionalen Sicherheit und der Verhaltens- bzw. Gebrauchssicherheit zu betrachten⁸².

Einen weiteren Sicherheitsaspekt bei automatisierten Fahrzeugen stellt die operationale Sicherheit dar, welche sich auf die Interaktion zwischen automatisierten Fahrzeugen und Passagieren⁸⁶ bzw. anderen Verkehrsteilnehmern bezieht⁸⁷. Im Kontext dieser Arbeit jedoch ist dieser Aspekt nur von

⁸¹ Bagschik, G. et al.: Framework for Safe Automated Vehicles (2018), S. 2439.

⁸² Schnieder, L.; Hosse, R.: Ganzheitliches Sicherheitsverständnis für Steuerungssysteme (2019).

⁸³ ISO: ISO/PAS 21448:2019 (2019). a: -; b: S. VI; c: S. 3.

⁸⁴ Abkürzung auf Grund des Titels der ISO/PAS21448:2019: Road vehicles – Safety of the intended functionality

⁸⁵ SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016), S. 12.

⁸⁶ Waymo: Waymo Safety Report (2018), S. 11.

⁸⁷ Bagschik, G. et al.: Framework for Safe Automated Vehicles (2018), S. 2439.

nachrangiger Bedeutung, da es nur auf die Identifikation sicherer Halteorte ankommt, ohne genauer auf den Anhaltevorgang einzugehen, bei welchem eine Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern relevant wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Entwicklung automatisierter und insbesondere fahrerloser Fahrzeuge neben den klassischen Sicherheitsaspekten zusätzlich eine ausführliche Betrachtung der funktionalen Sicherheit, Verhaltenssicherheit und operationalen Sicherheit erfolgt, damit sowohl im Fehlerfall einzelner Systemkomponenten als auch unter normalen Betriebszuständen das Fahrzeug in einem sicheren Zustand operiert.

2.3 Sichereres Anhalten

Wie bereits mehrfach angedeutet, besteht für die Absicherung des fahrerlosen Betriebs in urbanen Gebieten das Erfordernis, an sicheren Orten anzuhalten, sofern das Grenzkrisiko für den Betrieb in einem sicheren Zustand überschritten wird. Eine Überschreitung tritt ein, wenn das funktionale Fähigkeitsniveau des Fahrzeugs nicht ausreichend ist, um die funktionalen Anforderungen eines Streckenabschnitts abzudecken. Systemgrenzüberschreitungen beruhen auf internen und externen Ursachen und erfordern häufig eine Systemdegradation in die Rückfallebene *Sicheres Anhalten*.

In der Literatur wird das sichere Anhalten (engl.: safe stop) beispielsweise von Svensson et al.⁸⁸ definiert als gering dynamisches Manöver zum Erreichen eines risiko-minimalen Zustands, unter mittleren Gefahren, vorzugsweise außerhalb aktiver Fahrstreifen. Die Autoren differenzieren das sichere Anhalten von einem Nothalt (engl.: emergency stop) dadurch, dass ein Nothalt ein hoch dynamisches Manöver, d.h. das schnellstmögliche Anhaltemanöver mit Durchführung einer Notbremsung darstellt, woraus schwerwiegende Gefährdungen wie beispielsweise Auffahrunfälle resultieren.⁸⁸

Im Kontext dieser Arbeit wird das sichere Anhalten wie folgt eingeordnet:

Das sichere Anhalten stellt als Fahrmanöver eine Rückfallebene fahrerloser Fahrzeuge dar, welche im Fall einer Systemdegradation bzw. drohender Gefährdung eingenommen wird, um einen sicheren Zustand zu erhalten. Sobald eine Systemgrenzüberschreitung mit drohender Gefährdung während des Fahrbetriebs auftritt und eine Veränderung der Regelparameter oder Veränderung der Trajektorie einen sicheren Zustand nicht mehr gewährleistet, wechselt das automatisierte Fahrzeug in den Betriebsmodus des sicheren Anhaltens und leitet dadurch ein gering dynamisches Anhaltemanöver ein, um einen sicheren Halteort zu erreichen. Es ist erforderlich, dass zu jedem Zeitpunkt eine mögliche Anhaltetrajektorie zur Verfügung steht, um das sichere Anhalten auszuführen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die funktionalen Fahrzeugfähigkeiten auf Grund der Redundanz verschiedener Funktionen bzw. Komponenten und dem veränderten Funktionsumfang des Fahrzeugs während der Systemdegradation ausreichend sind, um den Anhaltevorgang sicher auszuführen und am Zielstandort einen sicheren Zustand zu erreichen. Das Anhaltemanöver selbst wird im Kontext dieser Arbeit auch als Nothaltemanöver bezeichnet, da durch die Systemgrenzüberschreitung eine Notsituation besteht, aus welcher heraus wieder ein sicherer Zustand hergestellt wird. Trotz des verwendeten Begriffs des

⁸⁸ Svensson, L. et al.: Safe Stop Trajectory Planning (2018), S. 517.

Nothaltmanövers wird hier im Gegensatz zu Svensson et al. die Unterscheidung getroffen, dass die Durchführung dieses Manövers mit geringer Dynamik und unter Verwendung der verbleibenden funktionalen Fähigkeiten und eingeschränktem Funktionsumfang mit vertretbarem Risiko möglich ist. Die Warnung anderer Verkehrsteilnehmer ist während des Betriebsmodus des sicheren Anhaltens durch Licht- und Hupzeichen möglich, um dadurch während des Haltevorgangs das Risiko zu verringern^{89a}. Dies stellt beispielsweise einen Aspekt der operationalen Sicherheit dar.

In der Realität müssen verbleibende Fahrzeugfähigkeiten beispielsweise bei einem Sensorausfall anhand der Selbstwahrnehmung des Fahrzeugs erfasst und in eine Selbstrepräsentation^{89b} überführt werden, sodass das Fahrzeug seine eigene Leistungsfähigkeit kennt. Auf Grundlage dieser Selbstrepräsentation werden dann Entscheidungen für Fahrmanöver mit vertretbarem Risiko getroffen, die zum Erreichen eines sicheren Halteortes angewendet werden. Da in einer Situation in der Regel verschiedene Halteorte zur Verfügung stehen, besteht die Notwendigkeit, einen Abgleich zwischen dem Risiko zur Erreichung eines Halteortes und dem Risikolevel eines Halteortes selbst durchzuführen. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, dass ein Halteort in der unmittelbaren Fahrzeugumgebung zwar ein schlechteres Risikolevel aufweist als ein Halteort, der sich weiter entfernt befindet, jedoch trotzdem vorzuzugswürdig zu wählen ist. Der Grund dafür liegt darin, dass die Möglichkeit einer starken Einschränkung der Fahrzeugfähigkeiten besteht und ein höheres oder nicht zumutbares Risiko zur Erreichung des weiter entfernten Halteortes besteht. Dieser Abgleich zwischen Risikolevel des Halteortes und Risiko zur Erreichung desselben auf Grundlage der Selbstrepräsentation wird angesichts der Komplexität dieser Thematik in dieser Arbeit nicht näher betrachtet und stellt einen eigenen Forschungsgegenstand dar. Stattdessen liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Identifikation und Risikoklassifizierung der sicheren Halteorte, unter der Annahme, dass das sichere Erreichen ebenfalls möglich ist.

Eine Grundlage hinsichtlich der Thematik der Selbstrepräsentation und damit verbundenen Fahrzeugfertig-/ -fähigkeiten legt beispielsweise Reschka in seiner Dissertation mit dem Thema „*Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung*“^{89c}.

2.3.1 Der Begriff der Systemdegradation

Der Begriff der Systemdegradation beschreibt die Verringerung des Funktionsumfangs eines Systems infolge einer verschlechterten bzw. Andeutung einer verschlechterten Leistungsfähigkeit. Dabei wird das Prinzip der funktionalen Degradation angewendet, um das Betriebsrisiko im zumutbaren Bereich zu halten, sofern externe oder interne Ursachen die Leistungsfähigkeit oder benötigte funktionale Anforderungen negativ beeinflussen. Das System passt seine Fahrweise ähnlich wie ein menschlicher Fahrer an die Bedingungen an. Fängt es beispielsweise an zu regnen und die Sicht wird schlechter, so wird die Geschwindigkeit durch den Fahrer bzw. durch das automatisierte Fahrzeug entsprechend an die Leistungsfähigkeit in der aktuellen Situation angepasst. Hierzu ist eine Selbstrepräsentation notwendig, damit das automatisierte Fahrzeug diese bei der Planung, Auswahl und Ausführung von

⁸⁹ Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017). a: S. 191, b: S. 156; c: -.

Fahrentscheidungen als Teil einer Situation berücksichtigt. Die funktionalen Möglichkeiten müssen zu jedem Zeitpunkt so gewählt werden, dass die Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs die benötigten Anforderungen abdeckt. Zur Durchführung einer funktionalen Degradation bzw. Systemdegradation ist es möglich

- kurzfristig Regelparameter wie Geschwindigkeit, Sicherheitsabstand, maximale Beschleunigung, Lenkgeschwindigkeit oder Lenkwinkel zu verändern,
- Fahrmanöver zu verändern, sodass bereits bei der Planung von Trajektorien und Geschwindigkeiten die Leistungsfähigkeit in einer Situation berücksichtigt wird,
- Fahrmanöver zu verbieten, wenn eine sichere Ausführung nicht möglich ist,
- das sichere Anhalten als Fahrmanöver auszuführen, sodass das Fahrzeug mit zumutbarem Risiko an einem sicheren Halteort zum Stillstand kommt und von dort aus beispielsweise die Möglichkeit besteht, dieses abzuschleppen.⁹⁰

Das sichere Anhalten als Rückfallebene stellt den Fokus dieser Arbeit dar, da bei Durchführung dieser Art von Degradation ein sicherer Halteort zum sicheren Abstellen des fahrerlosen Fahrzeugs benötigt wird.

Einen weiteren Begriff im Zusammenhang einer Systemdegradation liefert SAE International mit der Definition eines „*Dynamic Driving Task (DDT) Fallback[s]*“^{91a}. Mit diesem DDT-Fallback wird die Handlung des Fahrers oder des automatisierten Systems bezeichnet, die dynamische Fahraufgabe (engl.: Dynamic Driving Task) zu übernehmen oder die Einnahme eines risiko-minimalen Zustands auszuführen, nachdem ein leistungsrelevanter Systemfehler oder eine Überschreitung der bestimmungsgemäßen Systemgrenzen (engl.: ODD exit) aufgetreten ist. Die ODD (Operational Design Domain) beschreibt die spezifischen operationalen Bedingungen, unter welchen ein automatisiertes System eingesetzt wird bzw. die Ansprüche, für welche es entworfen wurde^{91b}. Sobald eine Fehlfunktion^{91c} auftritt, welche das System daran hindert, seine für die Fahraufgabe benötigte Leistungsfähigkeit bereitzustellen, muss ein DDT-Fallback, also eine Überführung des Systems in einen risiko-minimalen Zustand ausgeführt werden. Für automatisierte Fahrzeuge des Levels 4 oder 5 kommt der Fahrer nicht als Rückfallebene in Betracht, sodass das System den risiko-minimalen Zustand eigenständig erreichen muss^{91d}.

In den Grundzügen entspricht das sichere Anhalten als Fahrmanöver der funktionalen Degradation nach Reschka⁹² damit dem DDT-Fallback nach SAE^{91a}. Ist es nicht möglich, die benötigte Leistungsfähigkeit in einer Situation zu erbringen, bzw. besteht eine potenzielle Gefährdung, so wird das sichere Anhalten ausgeführt, um einen sicheren Zustand zu erhalten. Im Sinne von SAE wird parallel dazu bei Überschreitung der Systemgrenze (ODD exit) die Erreichung eines risiko-minimalen statt sicheren Zustands angestrebt.

⁹⁰ Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 189 ff.

⁹¹ SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016). a: S. 6; b: S. 12; c: S. 10; d: S. 6.

⁹² Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017), S. 189 ff.

Im Sinne der Erreichung eines sicheren Halteortes wird die Definition des sicheren Anhaltens als Systemdegradation (nach Reschka) hier vorzugsweise verwendet, da nicht nur ein risiko-minimaler, sondern auch sicherer Zustand als Zielstandort angestrebt wird⁹³. Die Überschreitung der Leistungsfähigkeit ist in diesem Kontext gleichzusetzen mit einer Systemgrenzüberschreitung, da interne oder externe Ursachen dazu führen, dass die funktionalen Fähigkeiten des Systems nicht mehr ausreichend sind, um die funktionalen Anforderungen abzudecken.

Im nachfolgenden Abschnitt werden im Zusammenhang der Systemdegradation und des damit verbundenen sicheren Anhaltens als Degradationsmöglichkeit einige interne und externe Ursachen vorgestellt, welche dazu führen, dass diese Rückfallebene notwendig wird.

Ursachen einer Systemdegradation

Wie bereits erwähnt, führen Veränderungen von internen und externen Bedingungen zu einer veränderten Leistungsfähigkeit eines automatisierten Fahrzeugs in einer Situation⁹² bzw. zu erhöhten Anforderungen. Diese Veränderungen von Bedingungen sind häufig die Ursache für eine Systemdegradation, wenn das Fähigkeitsniveau das Anforderungsniveau unterschreitet.

Nachfolgend werden einige externe und interne Ursachen einer Systemdegradation nach Reschka und Maurer⁹⁴ aufgezeigt.

Zu den internen Ursachen zählen beispielsweise technische Fehler des Fahrzeugführungssystems oder des Fahrzeugs selbst, welche zu verringerten funktionalen Fähigkeiten, also einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit führen. Unter diese Kategorie fallen zum Beispiel mechanische Defekte des Fahrzeugs wie defekte Antriebseinheiten, defekte Steuergeräte, defekte Radar- oder Lidarsensorik, defekte monokulare oder stereoskopische Video-Sensorik und ähnliche Defekte, welche die Funktion einzelner Systemkomponenten beeinträchtigen. Da sich diese Arbeit an der ISO 26262⁹⁵ orientiert und somit der Fokus auf der funktionalen Sicherheit elektrischer und elektronischer Systeme liegt, bildet diese Kategorie den Hauptaspekt hinsichtlich der Ursachen einer Systemdegradation.

Externe Ursachen lassen sich beispielsweise zurückführen auf veränderte Umweltbedingungen, welche erhöhte funktionale Fähigkeiten erfordern. Dazu gehören beispielsweise

- Wetterbedingungen, welche die Sicht beeinträchtigen (Schneefall, Regen, Nebel),
- Bedingungen, die zu einem schlechten Grip-Niveau zwischen Reifen und Fahrbahnuntergrund führen (Schnee, Eis, nasses Laub) und

⁹³ Eine Unterscheidung der Begriffe risiko-minimal und sicher im Zusammenhang des Halteortes erfolgt in Kapitel 2.5.

⁹⁴ Reschka, A.; Maurer, M.: Conditions for a safe state (2015), S. 4 f.

⁹⁵ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

-
- nicht beeinflussbare Naturphänomene, bzw. höhere Gewalt wie Erdbeben, Gewitter, Stürme oder auch Sonnenstürme, welche die Signalübertragung der Satellitennavigation beeinflussen können⁹⁶.

Zu weiteren externen Ursachen zählen

- unberechenbares Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, welches möglicherweise zu Kollisionen oder Kontrollverlusten führt sowie
- technische Fehler und/oder Unstimmigkeiten bei Straßenbeschilderungen, bei Fahrbahnmarkierungen, bei Ampelsystemen oder bei Verkehrsleitsystemen im Allgemeinen, wodurch Fehlinformationen generiert werden.

Zuletzt gibt es nach Reschka und Maurer⁹⁷ noch Ursachen, deren Zuordnung schwer differenzierbar ist. Dazu zählen etwa Situationen, die aus interner Perspektive bei der Fahrzeugentwicklung nicht bedacht wurden und somit zu nicht ausreichenden funktionalen Fähigkeiten führen. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn sich Fußgänger auf einer Kraftfahrstraße befinden und dieser Fall nicht bei der Entwicklung beachtet wurde. Aus externer Sicht könnte jedoch die These aufgestellt werden, dass beispielsweise ähnlich einem Erdbeben eine solche Situation nicht zwingend zu erwarten gewesen wäre, sodass die Bewertung sowohl als externe als auch interne Ursache möglich ist.

2.3.2 Differenzierung der Begriffe Szene, Situation und Szenario⁹⁸

Der Begriff der Situation ist bereits im Kontext verschiedener Sicherheitsaspekte gefallen, wobei bisher keine Definition diesbezüglich geliefert wurde, sondern lediglich der Verweis auf dieses Kapitel. Daher werden nun anhand eines Papers von Ulbrich et al.⁹⁹ die Definitionen einer Szene, einer Situation und eines Szenarios erläutert und eine Abgrenzung der Begriffe vorgenommen. Diese vorgeschlagenen Definitionen werden beispielsweise auch in der ISO/PAS 21448¹⁰⁰ verwendet und sollen nach Ulbrich et al. im Rahmen der Komplexität automatisierter Fahrzeuge den Abstimmungsaufwand innerhalb neuer Projektkonsortien reduzieren und domänenübergreifend den wissenschaftlichen Austausch erleichtern.

Szene

Der Situationsbegriff wird beispielsweise bei der Systemdegradation häufig verwendet, da die Leistungsfähigkeit eines automatisierten Systems immer in einer bestimmten Situation betrachtet wird und aus dieser Situation heraus die Notwendigkeit zur Entscheidung besteht, eine funktionale Degradation durchzuführen. Um eine Situation genau zu verstehen, muss als Grundlage jedoch zuerst der Szenenbegriff definiert werden. Dazu schreiben Ulbrich et al.:

⁹⁶ Carrano, C. et al.: Impacts of solar radio bursts on GPS (2009), S. 1–12.

⁹⁷ Reschka, A.; Maurer, M.: Conditions for a safe state (2015), S. 5.

⁹⁸ Der Inhalt dieses Kapitels wurde der angegebenen Quelle entnommen. Eigene Ergänzungen sind als solche deklariert.

⁹⁹ Ulbrich, S. et al.: Definitionen: Szene, Situation und Szenario (2015).

¹⁰⁰ ISO: ISO/PAS 21448:2019 (2019), S. 3–5.

„Eine Szene beschreibt eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die Szenerie, dynamische Elemente, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter wie auch die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst. Einzig eine Szenenrepräsentation in einer simulierten Welt kann allumfassend sein (objektive Szene, [...]). In der realen Welt ist sie immer unvollständig, fehlerbehaftet, unsicherheitsbehaftet und aus der Perspektive eines oder mehrerer Beobachter (subjektive Szene).“

Eine Szene umfasst demnach mehrere Bestandteile:

- Akteure sind innerhalb der Szene handelnde Elemente. Beobachter sind wahrnehmende Elemente. Die Selbstrepräsentation dieser Elemente bezieht sich auf deren Fertigkeiten und Fähigkeiten, d.h. sie repräsentiert die aktuelle Leistungsfähigkeit, aktuelle Systemfähigkeiten oder Fertigkeiten.
- Dynamische Elemente innerhalb einer Szene haben die Fähigkeit sich zu bewegen oder die zur Bewegung notwendige Energie. Dynamische Elemente können beispielsweise stehende oder fahrende Fahrzeuge sein, welche sich aktiv bewegen können (Subjekte). Aber auch andere, nicht aktiv handelnde Elemente, z.B. umherfliegende Müllsäcke, werden als dynamische Elemente bezeichnet. Deren Klassifizierung als Objekte erfolgt in der Situationsbewertung.
- Die Szenerie innerhalb einer Szene umfasst das Fahrstreifenetz, alle räumlich stationären Elemente, sowie quasi-stationäre Wetter-, Licht- und Umweltbedingungen, zeitlich veränderliche Lichtsignale und Wechselverkehrszeichen, da sie Eigenschaftswerte räumlich stationärer Elemente darstellen. Ebenfalls zur Szenerie gehört die vertikale Elevation, also beispielsweise Erhebungen auf einer Fahrbahn.

Die Beziehungen zwischen den genannten Entitäten, also zwischen dynamischen Elementen, Szenerie und Selbstrepräsentation der Akteure und Beobachter ist ebenfalls Bestandteil einer Szene. Nachfolgend werden in Abbildung 2-4 die Bestandteile einer Szene grafisch dargestellt.

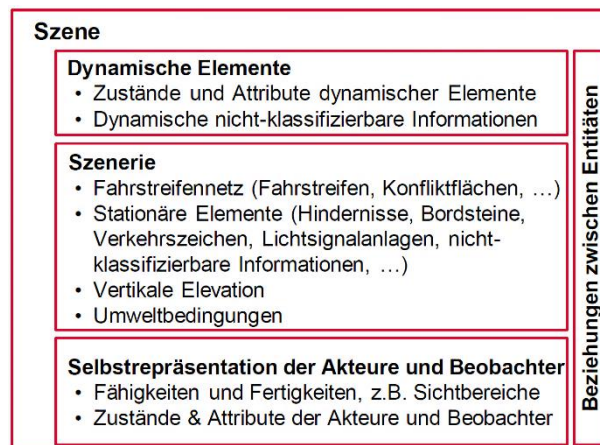


Abbildung 2-4: Beispielhafte Darstellung der Entitäten einer Szenenrepräsentation¹⁰¹

Nach Sicht der Autoren ist eine Szene, als Momentaufnahme eines Umfelds, die Schnittstelle zwischen Wahrnehmung einerseits und der Verhaltensplanung und -ausführung andererseits. Eine Szene

¹⁰¹ Ulbrich, S. et al.: Definitionen: Szene, Situation und Szenario (2015), S. 3.

ist immer, auch aus aggregierter Sicht mehrerer Beobachter, eine subjektive Wahrnehmung und kann nur in einer simulierten Umgebung objektiv sein.

Situation

Aufbauend auf dem Szenenbegriff wird eine Situation nach Ulbrich et al. wie folgt definiert:

„Eine Situation beschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind [...]. Sie umfasst alle relevanten Bedingungen, Möglichkeiten und Determinanten von Handlungen [...]. Eine Situation wird aus der Szene durch einen Prozess der Informationsauswahl und -augmentierung abgeleitet, basierend auf transienten (z.B. missionspezifischen) wie auch permanenten Zielen und Werten. Folglich ist eine Situation immer subjektiv, indem sie die Sicht eines Elements repräsentiert.“

Eine Situation kann vollständig aus Zielen und Werten eines Systems und aus einer Szene abgeleitet werden und besteht aus drei Bestandteilen:

- Die funktionsrelevanten Aspekte einer Szene, also relevante dynamische Elemente, relevante Szenerie-Aspekte und relevante Aspekte der Selbstrepräsentation sind das Ergebnis eines Informationsselektionsprozesses, welcher die Situationsrepräsentation gegenüber der Szene auf die wesentlichen und relevanten Aspekte reduziert. Als Beispiel werden ein Radfahrer und ein Fahrzeug betrachtet, welche sich parallel zueinander in die gleiche Fahrtrichtung bewegen. Möchte der Radfahrer durch weitere Geradeausfahrt eine Kreuzung überqueren, so ist dieser nur Bestandteil der Situation des Fahrzeugs, wenn das Fahrzeug abbiegt und sich die Trajektorien des abbiegenden Fahrzeugs und des geradeausfahrenden Radfahrers kreuzen. Fährt das Fahrzeug hingegen geradeaus parallel zum Radfahrer weiter und die Trajektorien kreuzen sich nicht, ist der Radfahrer zwar Bestandteil der Szene, aber nicht Bestandteil der Situation des Fahrzeugs.
- Durch Ziele und Werte wird eine Situation zudem augmentiert, d.h. sie umfasst zusätzlich funktionsrelevante transiente Ziele und Werte wie beispielsweise eine Fahrmission, Fahrweisungen oder Verhaltenspräferenzen sowie permanente Ziele wie regulatorische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Ein Beispiel hierfür ist die explizite Bewertung der Nützlichkeit eines Fahrstreifenwechsels zur Missionserreichung als transientes Ziel, wodurch die Situation augmentiert wird.
- Zuletzt sind Informationen, die weder aus der Szene selbst stammen, noch aus den Zielen und Werten augmentiert werden, Bestandteil einer Situation, wenn sie durch eine Situationsbewertung evaluiert und angereichert werden (relevante funktionspezifische Aspekte).

Die nachfolgende Abbildung 2-5 veranschaulicht die Bestandteile einer Situation.

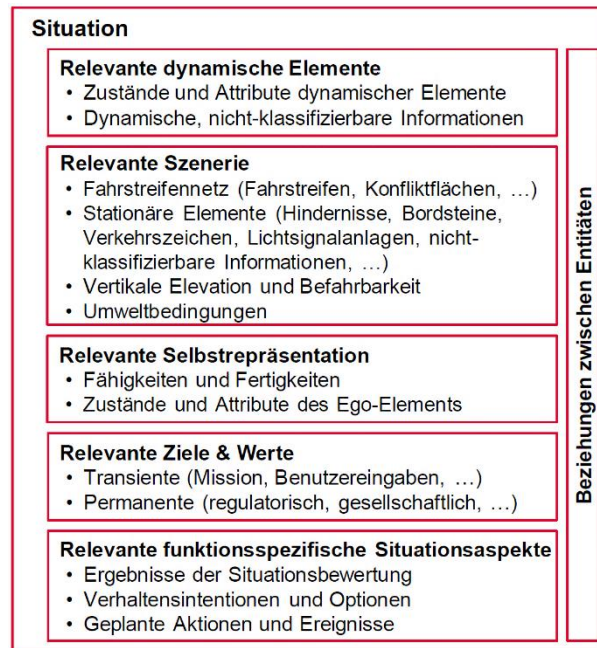


Abbildung 2-5: Beispielhafte Darstellung der Entitäten einer Situationsrepräsentation¹⁰²

Mit Hilfe der hier dargestellten Definition für eine Situation sind nun die bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnten Definitionen, mit dem Bestandteil einer Situation, eindeutig spezifiziert.

Eine Systemdegradation wird beispielweise in einer bestimmten Situation durchgeführt, damit der Funktionsumfang des automatisierten Fahrzeugs an die Leistungsfähigkeit angepasst wird. Dazu besteht die Notwendigkeit, dass zu jedem Zeitpunkt die funktionsrelevanten Aspekte einer Szene, also die relevanten dynamischen Elemente, die relevante Szenerie und die relevante Selbstrepräsentation analysiert werden. Mittels der Ziele und Werte wird die Situation augmentiert. Durch die Situationsbewertung ergeben sich zusätzliche relevante funktionspezifische Situationsaspekte. Hier wird das Beispiel des umherfliegenden Müllsacks als Teil der Situationsbewertung wieder aufgegriffen, dessen Relevanz für das Fahrzeug und seine Fahrmission bewertet werden muss. Die Situationsrepräsentation dient somit zu jedem Zeitpunkt als Eingangsgröße für das System, um zu bewerten, ob benötigte funktionale Anforderungen durch die Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs in einer bestimmten Situation abgedeckt werden oder ob eventuell eine funktionale Degradation notwendig ist.¹⁰³

Szenario

Zuletzt werden Szene und Situation um den dritten Begriff in diesem Zusammenhang, dem sogenannten Szenario, komplettiert. Dieser wird insbesondere bei Durchführung der HARA für Halteorte in Kapitel 4.5 relevant, wenn es darum geht, gefährlichen Szenarien zu identifizieren.

¹⁰² Ulbrich, S. et al.: Definitionen: Szene, Situation und Szenario (2015), S. 8.

¹⁰³ Eigene Ergänzung in Anlehnung an die Definition einer Systemdegradation in Kapitel 2.3.1.

Nach Ulbrich et al. wird ein Szenario wie folgt definiert:

„Ein Szenario beschreibt die zeitliche Entwicklung von Szenenelementen innerhalb einer Folge von Szenen, welche mit einer Startszene beginnt. Aktionen und Ereignisse ebenso wie Ziele und Werte können spezifiziert werden, um diese zeitliche Entwicklung in einem Szenario festzulegen. Im Gegensatz zu Szenen decken Szenarien eine gewisse Zeitspanne ab.“

Folglich werden bei einem Szenario verschiedene Szenen durch Aktionen bzw. Ereignisse miteinander verknüpft. Eine Darstellung als Baumdiagramm ist möglich. Üblicherweise resultieren aus einer Startszene (Anfangsknoten in einem Baumdiagramm) mehrere mögliche Aktionen bzw. Ereignisse (Kanten im Baumdiagramm). Nach Ausführung einer Aktion ergibt sich dadurch eine neue Szene, innerhalb welcher üblicherweise wieder die Ausführung verschiedener Aktionen möglich ist, sodass sich aus einer Startszene durch Wahl verschiedener Aktionen unterschiedliche Szenarien ergeben.

Ein Beispiel hierzu ist ein Fahrstreifenwechsel auf einer zweistreifigen Autobahn wie in Abbildung 2-6 dargestellt, wobei die Startszene dadurch gekennzeichnet ist, dass das mittlere Fahrzeug (blau) den Fahrstreifen wechseln möchte und dazu die Aktionen Blinken, Fahrstreifenwechsel und Fahrstreifenfolgen nacheinander ausführt. Nach der Ausführung einer Aktion ergibt sich jeweils eine neue Szene, welche im Baumdiagramm als Punkte des gestrichelten Pfades dargestellt wird. Der gesamte gestrichelte Pfad, bestehend aus mehreren Szenen sowie den genannten Aktionen bildet ein Szenario. Die anderen Pfade im Diagramm (durchgezogene Linien) repräsentieren mögliche Szenarien nach Durchführung anderer Aktionen, wodurch sich innerhalb eines Szenarios jeweils andere Szenen ergeben. Diese Szenarien werden hier jedoch nicht näher erläutert, da viele andere Kombinationen existieren.

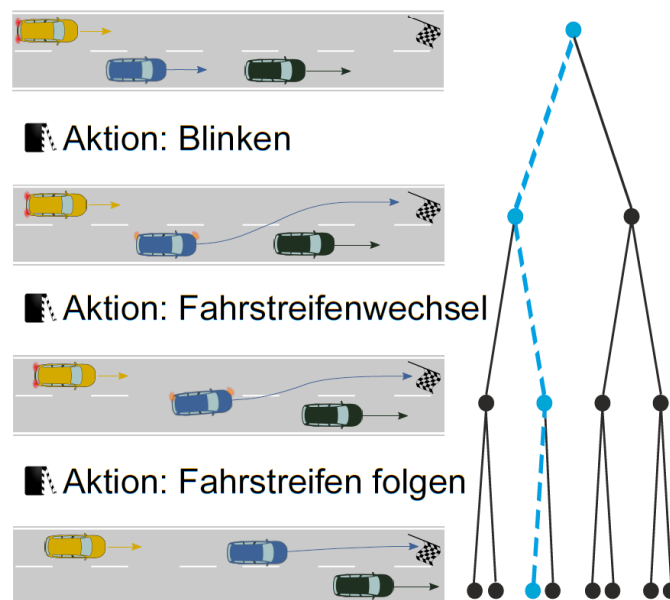


Abbildung 2-6: Beispielhafte Darstellung eines Szenarios¹⁰⁴

¹⁰⁴ Ulbrich, S. et al.: Definitionen: Szene, Situation und Szenario (2015), S. 11.

2.4 Ableitung initialer Kriterien für Halteorte¹⁰⁵

Nachdem nun verschiedene relevante Definitionen und Begriffe im Zusammenhang des Sicherheitsverständnisses automatisierter Fahrzeuge erläutert wurden, werden in diesem Kapitel sichere und unsichere Zustände aus der Literatur identifiziert. Dies erfolgt nachfolgend anhand eines Sicherheitskonzeptes für autonome Fahrzeuge von Reschka¹⁰⁶, welcher verschiedene Konzepte und Projektfahrzeuge analysierte. Anschließend werden bereits initiale Kriterien abgeleitet, anhand derer es möglich ist, die Sicherheit von Halteorten zu klassifizieren.

2.4.1 Sichere und unsichere Zustände aus der Literatur

- Bei automatisierter Fahrt während eines Staus ist das Anhalten an einem ungefährlichen Ort ein sicherer Zustand. Auf Grund der geringen Relativgeschwindigkeit in einem Verkehrsstau besteht die Möglichkeit, dass dieser Ort ein aktiver, befahrener Fahrstreifen ist.
- Im Fall eines Notfallassistenten, der die Fahrzeugkontrolle bei Bewusstseinsverlust des Fahrers übernimmt, ist das Anhalten auf dem Seitenstreifen einer Autobahn als sicherer Zustand genannt. Sofern kein Seitenstreifen vorhanden oder kein Fahrstreifenwechsel zum Seitenstreifen möglich ist, kann zudem ein kontrolliert langsam fahrendes Fahrzeug oder ein stehendes Fahrzeug auf einem Fahrstreifen, das auf sich aufmerksam macht, einen sichereren Zustand darstellen, als ein unkontrolliert fahrendes Fahrzeug.
- Durch Übergabe des Fahrzeugs an den Fahrer wird bei automatisierten Fahrzeugen ebenfalls ein sicherer Zustand hergestellt. Im Kontext dieser Arbeit jedoch handelt es sich um fahrerlose Fahrzeuge (SAE-Level 4 oder 5), sodass sich hieraus keine Kriterien für einen sicheren Halteort ableiten lassen.
- Eine weitere Möglichkeit einen sicheren Zustand herzustellen besteht durch die Möglichkeit, ein Nothaltemanöver, hier das schnellstmögliche Abbremsen eines automatisierten Fahrzeugs, durchzuführen, wenn anschließend ein Prozess der Selbstheilung gestartet wird. Durch Neustart verschiedener Komponenten besteht gegebenenfalls die Möglichkeit, die Funktionsfähigkeit und damit einen sicherer Zustand wiederherzustellen. Auch diese Art der Erreichung eines sicheren Zustands ist im Kontext dieser Arbeit ohne Relevanz, da das hier erwähnte Nothaltemanöver mit einer zu großen Gefahr im öffentlichen Straßenverkehr einhergeht und daher keine Option im Kontext des sicheren Anhaltens darstellt. Zudem wird, wie bereits erwähnt, die Annahme getroffen, dass ein sicheres Anhalten mit Stehenbleiben an einem sicheren Ort als funktionale Degradation ausgeführt wird, sodass eine Selbstheilung im Kontext der Identifikation sicherer Halteorte nicht relevant ist.
- Des Weiteren wird das Verlassen des fließenden Verkehrs und Halten am Straßenrand, oder auf dem aktuellen Fahrstreifen (hier: außerhalb von Autobahnen) sowie die Weiterfahrt mit

¹⁰⁵ Der Inhalt dieses Kapitels wurde der angegebenen Quelle entnommen.

¹⁰⁶ Reschka, A.: Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge (2015).

erhöhtem Sicherheitsabstand oder verringerter Geschwindigkeit genannt, um einen sicheren Zustand herzustellen. Die beiden letzten Punkte stellen einfache Maßnahmen einer funktionalen Degradation dar und sind daher im Kontext dieser Arbeit und im Kontext der Rückfallebene *Sicheres Anhalten* ebenfalls nicht relevant.

- Zuletzt wird das Halten am Fahrbahnrand einer Autobahn als sicherer Zustand genannt, wenn kein Seitenstreifen, keine Nothaltebucht oder kein ähnlicher Standort verfügbar sind.

Neben den sicheren Zuständen führen auch bestimmte Kriterien dazu, dass ein Zustand unsicher ist. Nachfolgend werden einige unsichere Zustände aufgelistet und im Anschluss daran initiale Kriterien für Halteorte abgeleitet.

- Durch Halten auf Fahrstreifen einer Autobahn ist ein Zustand unsicher, wenn es dadurch zu einer zu späten Wahrnehmung des automatisierten Fahrzeugs und daher zu einer gefährlichen Situation kommt. Das sichere Verlassen des Fahrzeugs im Brandfall oder eine mögliche Blockade einer Rettungsgasse im Stau stellen weitere Gefährdungen in diesem Kontext dar.
- Weitere unsichere Zustände bestehen, wenn Rettungsfahrzeuge auf einstreifigen Straßen oder Rettungswege und -zufahrten für Rettungsfahrzeuge vor Gebäuden oder anderen Einrichtungen blockiert werden. Dadurch kommt es ggf. zur Verzögerung bzw. Behinderung von Rettungsaktionen.

2.4.2 Initiale Kriterien für Halteorte

Nachdem nun verschiedene sichere und unsichere Zustände bzw. auch Halteorte dargelegt wurden, werden daraus Kriterien abgeleitet, welche Einfluss auf die Sicherheit eines Halteortes nehmen:

- Die Sicherheit eines Halteortes ist abhängig von der *Relativgeschwindigkeit* eines automatisierten Fahrzeugs zu anderen Verkehrsteilnehmern. Je geringer die Relativgeschwindigkeit (an einem Halteort), desto besser sind andere Verkehrsteilnehmer in der Lage, drohende Gefahren durch rechtzeitige Reaktionen, d.h. Abbremsvorgänge und Ausweichmanöver, abzuwenden.
- Des Weiteren ist die Sicherheit eines Halteortes abhängig vom *Verkehrsfluss*, bzw. der *Blockade nachfolgender Fahrzeuge*. Seitenstreifen, Nothaltebuchten, Fahrbahnränder oder ähnliche Standorte sind sicherer als Fahrstreifen innerhalb des Verkehrsflusses, da sich dort in der Regel keine oder nur in Ausnahmefällen Fahrzeuge von hinten nähern bzw. ein Ausweichen besser möglich ist und somit das Risiko einer Kollision weitestgehend ausgeschlossen wird.
- Die Sicherheit eines Halteortes ist abhängig von der *Wahrnehmung* des automatisierten Fahrzeugs. Je früher dieses von anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen wird, desto eher besteht die Möglichkeit, gefährliche Situationen zu vermeiden. Da die Wahrnehmung wiederum von verschiedenen Faktoren abhängig ist, wird hier auf Kapitel 3 verwiesen, in welchem mittels ausgewählter Methoden weitere Kriterien in diesem Zusammenhang identifiziert werden.

-
- Ein weiteres Kriterium für die Sicherheit eines Halteortes ist das Bestehen einer Möglichkeit für Passagiere, das Fahrzeug *sicher zu verlassen*.
 - Schließlich ist die Sicherheit bzw. Unsicherheit eines Halteortes abhängig von einer *möglichen Blockade von Rettungswegen oder Rettungszufahrten*.

Die aus den sicheren und unsicheren Zuständen hervorgehenden Kriterien für Halteorte stimmen mit den Bedingungen für einen sicheren Zustand nach Reschka und Maurer¹⁰⁷ überein. Dazu zählen unter anderem die Relativgeschwindigkeit, die Sichtbarkeit für andere Verkehrsteilnehmer und die Blockade bzw. Behinderung von Rettungsfahrzeugen- und Rettungswegen.

Dieser Abschnitt gibt zusammenfassend einen Ausblick hinsichtlich der Identifikation und Kategorisierung von Kriterien für sichere Halteorte in Kapitel 3. Zugleich wird mittels der erwähnten Definitionen, im Kontext der Sicherheit automatisierter Fahrzeuge und anhand der hier identifizierten initialen Kriterien, ein besseres Verständnis geschaffen. Darauf aufbauend wird im nachfolgenden Kapitel eine Arbeitsdefinition für einen sicheren Halteort entwickelt.

2.5 Zusammenfassende Arbeitsdefinition eines sicheren Halteortes

Mit der Arbeitsdefinition eines sicheren Halteortes wird das zweite Kapitel abgeschlossen und die Grundlage für das weitere Vorgehen geschaffen. Das bedeutet, dass ausgehend von dieser Definition, Kriterien für sichere Halteorte im 3. Kapitel identifiziert und kategorisiert werden, um im Anschluss daran eine Methodik zur Identifikation sicherer Halteorte zu entwickeln (Kapitel 4). Das Begriffspaar *sicherer Halteort* ist in dieser Arbeit gleichbedeutend mit der Verwendung eines *sicheren Ortes für Nothaltemanöver fahrerloser Fahrzeuge* im Titel der Arbeit, da die Identifikation sicherer Halteorte im Kontext des sicheren Anhaltens fahrerloser Fahrzeuge betrachtet wird.

Die Definition eines sicheren Halteortes besteht im Kontext dieser Arbeit aus mehreren Komponenten:

1. Ein sicherer Halteort ist ein möglicher Zielstandort, welcher eingenommen wird, wenn das sichere Anhalten (2.3) als Fahrmanöver einer Systemdegradation (2.3.1) ausgeführt wird, um einen sicheren Zustand (2.1.1) aufrechtzuerhalten bzw. am Zielstandort einzunehmen. Die Durchführung dieses gering dynamischen Nothaltemanövers ist notwendig, wenn die Leistungsfähigkeit eines fahrerlosen Fahrzeugs in einer Situation (2.3.2) nicht ausreichend ist, um die Anforderungen in dieser Situation zu erfüllen und damit das Grenzkrisiko für Zumutbarkeit (2.2.1) im Fahrbetrieb überschritten wird. Sicheres Anhalten wird nur ausgeführt, wenn andere funktionale Degradationsmaßnahmen wie etwa Geschwindigkeitsverringerungen oder vergrößerte Sicherheitsabstände eine potenzielle Gefährdung (2.2.1) nicht abwenden können. Die Ursachen für eine Systemdegradation sind externer oder interner Natur (2.3.1).
2. Der sichere Halteort muss einen sicheren Zustand darstellen, d.h. es darf während des Betriebsmodus des Haltens am Halteort kein unzumutbares Risiko für das System selbst oder

¹⁰⁷ Reschka, A.; Maurer, M.: Conditions for a safe state (2015), S. 6.

die betroffene Umwelt, d.h. insbesondere für alle beteiligten Personen, ausgehen. Es darf also keine Gefährdung eintreten, da dies eine Überschreitung des Grenzzrisikos darstellt.

3. Die Dauer des Haltevorgangs beginnt mit dem Zeitpunkt des Stehenbleibens und endet mit dem Zeitpunkt des Entfernens des Fahrzeugs, beispielsweise durch einen Teleoperator oder Abschleppwagen.
4. Die Bewertung der Zumutbarkeit eines Risikos für einen sicheren Zustand (beim Halten) erfolgt in dieser Arbeit mittels Durchführung einer zweigeteilten HARA (4) hinsichtlich der Dimensionen Kontrollierbarkeit (4.6.1), Auftretenswahrscheinlichkeit (4.6.2) und Schadensschwere (4.6.3) und entsprechender Zuordnung eines Risikolevels (4.8). Ein Halteort stellt einen sicheren Zustand dar, wenn es möglich ist, ihm das Risikolevel QM zuzuordnen oder sofern eine der Ausprägungen der Risikodimensionen die niedrigste Einstufung aufweist und somit kein Risiko besteht. Dies wird begründet durch die Definition der Risikolevel (4.8). Es wird die Annahme getroffen, dass die fehlende Notwendigkeit zur Formulierung von Sicherheitszielen zur Erreichung funktionaler Sicherheit innerhalb der ursprünglichen HARA (4.1) auch die Sicherheit bei Übertragung des Vorgehens auf Halteorte begründet.
5. Unter der Annahme, dass ein Risikoabgleich zwischen dem Risiko zur Zielerreichung eines Halteortes (anhand der aktuellen Leistungsfähigkeit des fahrerlosen Fahrzeugs in einer Situation) und des Halteortes selbst (anhand des Risikolevels) möglich ist, wird derjenige Halteort ausgewählt, dessen Gesamtrisiko minimal ist. Somit besteht theoretisch die Möglichkeit, in bestimmten Situationen auch einen Halteort auszuwählen, welcher nicht einem sicheren Zustand entspricht und somit nicht der Definition eines sicheren Halteortes zugeordnet wird, jedoch hinsichtlich des Gesamtrisikos risiko-minimal ist.
6. Harte Kriterien (siehe 3.2) für Halteorte müssen in jedem Fall erfüllt werden. Andernfalls kommt der mögliche Zielstandort nicht als Halteort in Betracht.

Die zusammenfassende Definition lautet daher:

Ein sicherer Halteort ist der sichere Zielzustand eines fahrerlosen Fahrzeugs nach Ausführung eines Nothaltemanövers, welchem durch Bewertung hinsichtlich anwendbarer gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen innerhalb einer HARA für Halteorte ein zumutbares Risikolevel (kein RL oder RL QM) zugeordnet wird.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Identifikation sicherer Halteorte durch Bestimmung von Risikoleveln. Nicht Fokus der Arbeit ist

- die Bestimmung des Risikos während des Fahrbetriebs aus Abgleich zwischen funktionalen Fähigkeiten und funktionalen Anforderungen sowie
- die Definition eines Grenzzrisikos während des Fahrbetriebs.

Stattdessen wird vorausgesetzt, dass ein sicheres Anhalten ausgeführt wird, da die Einhaltung des Grenzzrisikos während der Fahrt nicht möglich ist. Das Grenzzrisiko eines Halteortes wird hingegen durch die Erreichung des QM-Risikolevels definiert.

Die sich aus der Risikoanalyse dieser Arbeit ergebenden Risikolevel für Halteorte dienen als Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten, um einen Risikoabgleich zwischen Risiko zur Zielerreichung eines Halteortes und Risiko eines Halteortes selbst durchzuführen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen des zweiten Kapitels besteht durch die gegebenen Definitionen und Erläuterungen nun die Möglichkeit, im dritten Kapitel Kriterien für Halteorte zu identifizieren und zu kategorisieren. Diese dienen wiederum im vierten Kapitel als Ausgangslage zur Durchführung der HARA, um sichere Orte für Nothaltemanöver bzw. sichere Halteorte zu identifizieren.

3 Identifikation und Kategorisierung von Kriterien für sichere Halteorte

In diesem Kapitel werden Kriterien identifiziert und kategorisiert, welche Einfluss auf die Sicherheit von Halteorten ausüben und somit als Grundlage dienen, eine Gefahrenanalyse und Risikobewertung für Halteorte durchzuführen. Je nach Ausprägung bzw. Kombination von Kriterien werden verschiedene Kategorien für gefährliche Szenarien oder Missionsgefährdungen in der HARA festgelegt und den Halteorten dementsprechend Risikolevel zugeordnet. Im Gegensatz zu den bereits in Kapitel 2.4.2 identifizierten Kriterien anhand der Literatur, beruht das Vorgehen in diesem Kapitel auf der Anwendung zweier Methoden, welche in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 erläutert und angewendet werden.

Anschließend erfolgt in Kapitel 3.2 eine Identifikation von harten Kriterien. Diese dienen dazu, mögliche Halteorte bereits ohne Durchführung einer HARA von der Gesamtheit auswählbarer Halteorte auszuschließen, da diese auf Grund gesetzlicher oder gesellschaftlich sozialer Aspekte ungeeignet sind.

Zuletzt werden Kriterien identifiziert, welche bei der Auswahl von Halteorten auf Grund gesetzlicher Regelungen eine hohe Priorität haben (3.3), jedoch nicht den harten Kriterien zugeordnet werden. Diese Kriterien werden bei der Entwicklung gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen besonders berücksichtigt. Abschließend werden zu Kapitel 3 die gewonnen Erkenntnisse zusammengefasst (3.4).

3.1 Methoden zur Identifikation von Kriterien für Halteorte

In diesem Kapitel werden zwei Methoden zur Ableitung von Kriterien für die Sicherheit von Halteorten vorgestellt und angewendet. Bei der ersten Methode wird ein Brainstorming-Ansatz als Bottom-Up-Vorgehen durchgeführt, wohingegen bei der zweiten Methode eine Fehlerbaumanalyse (engl.: Fault-Tree-Analysis – FTA) als Top-Down-Ansatz angewendet wird.

3.1.1 Brainstorming zur Ableitung von Kriterien

In der Ausgangslage wird das Brainstorming zur Identifikation von Halteorten einerseits und zur Ableitung von Kriterien für die Sicherheit andererseits angewendet. Diese Methode ist eine bekannte Kreativitätstechnik zur Entwicklung von Ideen und kann entweder innerhalb einer Gruppe durchgeführt werden oder durch einzelne Personen. In der Regel umfasst das Vorgehen die drei Phasen der Einleitung, Ideenfindung und Bewertung.¹⁰⁸

In dieser Arbeit wurde das Verfahren vom Autor als Einzelperson durchgeführt, um einen ersten Überblick über mögliche Halteorte zu erhalten, diese zu dokumentieren und einen Ausgangspunkt für die Identifikation weiterer Kriterien zu schaffen.

¹⁰⁸ Kreativitaetstechniken.info: Brainstorming (2011).

Die Phase der Einleitung wird durch die Konkretisierung der Aufgabenstellung der Arbeit (1.2) und durch Einarbeitung in das Thema der Automatisierung von Fahrzeugen mit dem Fokus des sicheren Anhaltens abgedeckt.

Die Ideenfindungsphase beruht auf der Sammlung von spontanen Ideen für Orte, die instinktiv zum Halten, nach der Ausführung eines Nothaltemanövers, infrage kommen bzw. nicht infrage kommen. Die Suche nach Halteorten beschränkt sich dabei auf den städtischen Straßenverkehr, da im Kontext des UNICARagil-Projektes der Fokus auf dem urbanen Fahrzeugeinsatz liegt¹⁰⁹.

Zuletzt werden in der Bewertungsphase die gelisteten Halteorte bereits hinsichtlich ihrer vermeintlichen Sicherheit anhand einer Bewertung kategorisiert. Hier wird jedoch noch nicht die Definition eines sicheren Halteortes angewendet, da in der Ausgangslage dazu noch keine Aussage möglich ist, sondern erst im Zuge der HARA getroffen werden kann. Anhand der Bewertung erfolgt eine Ableitung von Kriterien für jeden identifizierten Halteort.

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Brainstormings in Tabelle 3-1 aufgelistet.

Tabelle 3-1: Brainstorming-Ergebnisse für mögliche Halteorte und Kriterien

Möglicher Halteort	Bewertung	Kriterien
am rechten Fahrbahnrand/Bankette	<ul style="list-style-type: none"> sicher, sofern rechtzeitiges Anhalten nachfolgender Verkehrsteilnehmer (VT) oder Ausweichen möglich ist (z.B. auf andere Fahrstreifen) und Fahrgäste beim Verlassen des Fahrzeugs nicht in den Verkehrsfluss geraten 	<ul style="list-style-type: none"> Anhalteweg (Geschwindigkeit, Untergrund, Reaktionszeit) vorhandene Sichtweite Fahrstreifenanzahl sicheres Verlassen des Fahrzeugs (muss prinzipiell immer möglich sein, d.h. keine harten lateralen Begrenzungen vor den Türen und Verlassen nicht im fließenden Verkehr, geringe Relativgeschwindigkeiten)
auf Fahrstreifen im Verkehrsfluss	<ul style="list-style-type: none"> sicher, sofern rechtzeitiges Anhalten nachfolgender VT oder Ausweichen möglich ist und Fahrgäste beim Verlassen des Fahrzeugs nicht in den Verkehrsfluss geraten 	<ul style="list-style-type: none"> Anhalteweg (Geschwindigkeit, Untergrund, Reaktionszeit) vorhandene Sichtweite Fahrstreifenanzahl sicheres Verlassen des Fahrzeugs
in Parklücken auf Parkstreifen	<ul style="list-style-type: none"> sicher, da nicht im Verkehrsfluss unsicher, wenn Fahrgäste beim Verlassen des Fahrzeugs in den Verkehrsfluss geraten (z.B. auf Radwegen) 	<ul style="list-style-type: none"> Verkehrsfluss sicheres Verlassen des Fahrzeugs
in Parklücken auf Parkplätzen	<ul style="list-style-type: none"> sicher, da nicht im Verkehrsfluss 	<ul style="list-style-type: none"> Verkehrsfluss
auf Parkplätzen (im Sinne der Anlage mehrerer Parklücken bzw. Stellplätze), Serviceareale (z.B. Tankstellen)	<ul style="list-style-type: none"> sicher, da geringe Geschwindigkeiten unsicher, wenn die Sicht auf Fußgänger durch das fahrerlose Fahrzeug (Egofahrzeug) eingeschränkt wird 	<ul style="list-style-type: none"> Anhalteweg (Geschwindigkeit, Untergrund, Reaktionszeit) Sichteinschränkung durch Egofahrzeug
in Haltebuchten/Bushaltestellen	<ul style="list-style-type: none"> sicher, da nicht im Verkehrsfluss unsicher, wenn Fahrgäste beim Aussteigen in den Verkehrsfluss geraten 	<ul style="list-style-type: none"> Verkehrsfluss sicheres Verlassen des Fahrzeugs
auf Busfahrstreifen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da Kollisionen mit Bussen gefährlich sein können 	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeugmasse nachfolgender Fahrzeuge
in engen Einbahnstraßen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da Vorbeifahrt ggf. nicht möglich ist und Rettungsfahrten behindert werden 	<ul style="list-style-type: none"> Behinderung von Einsatz-/ Rettungsfahrten (Fahrstreifenbreite, harte laterale Begrenzungen)
auf Schienen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da Kollisionen mit Schienenfahrzeugen besonders gefährlich sein können und deren Anhaltewege länger sind 	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeugmasse von Schienenfahrzeugen Anhalteweg (Geschwindigkeit, Untergrund: Schienen, Reaktionszeit)
auf Kreuzungen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da die Blockade von Kreuzungen Rettungsfahrten behindert 	<ul style="list-style-type: none"> Behinderung von Einsatz-/ Rettungsfahrten

¹⁰⁹ Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures (2018), S. 23.

Möglicher Halteort	Bewertung	Kriterien
in Kreuzungs-/ Einmündungsbereichen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da durch das Egofahrzeug eine Sichtbehinderung für andere VT besteht 	<ul style="list-style-type: none"> Sichteinschränkung durch Egofahrzeug
in Kreisverkehren	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da die Blockade von Kreuzungen Rettungsfahrten behindert 	<ul style="list-style-type: none"> Behinderung von Einsatz-/ Rettungsfahrten
in Kurven	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, sofern kein rechtzeitiges Anhalten oder Ausweichen möglich ist 	<ul style="list-style-type: none"> Anhalteweg (Geschwindigkeit, Untergrund, Reaktionszeit) Fahrstreifenanzahl vorhandene Sichtweite Kurvenlänge und -radius
hinter Kuppen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, sofern kein rechtzeitiges Anhalten oder Ausweichen möglich ist 	<ul style="list-style-type: none"> Anhalteweg (Geschwindigkeit, Untergrund, Reaktionszeit) Fahrstreifenanzahl vorhandene Sichtweite
in engen Tunneln/Überführungen/Unterführungen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da Vorbeifahrt ggf. nicht möglich ist und Rettungsfahrten behindert werden 	<ul style="list-style-type: none"> Behinderung von Einsatz-/ Rettungsfahrten
vor Rettungseinfahrten/-zufahrten	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da Vorbeifahrt ggf. nicht möglich ist und Rettungsfahrten behindert werden 	<ul style="list-style-type: none"> Behinderung von Einsatz-/ Rettungsfahrten
neben Fahrbahnverengungen wie Verkehrsinseln und Fahrbahnteilern	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da Vorbeifahrt ggf. nur unter Nutzung des Fahrstreifens in Gegenrichtung möglich ist und ein Verkehrsstau ausgelöst werden kann, welcher Rettungsfahrten verzögert 	<ul style="list-style-type: none"> sicheres Vorbeifahren Behinderung von Einsatz-/ Rettungsfahrten
vor Fußgängerüberwegen/Radwegen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, wenn die Sicht auf Fußgänger oder Radfahrer durch das Egofahrzeug eingeschränkt wird 	<ul style="list-style-type: none"> Sichteinschränkung durch Egofahrzeug
auf Einfädel-/ Ausfädelstreifen	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da Vorbeifahrt ggf. nicht möglich ist und/oder eine Verkehrsblockade Rettungsfahrten behindert 	<ul style="list-style-type: none"> Behinderung von Einsatz-/ Rettungsfahrten
in verkehrsberuhigten Bereichen	<ul style="list-style-type: none"> sicher, geringe Geschwindigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Anhalteweg (Geschwindigkeit, Untergrund, Reaktionszeit)
in absoluten Halteverboten bzw. Parkverboten	<ul style="list-style-type: none"> unsicher, da Vorbeifahrt ggf. nicht möglich ist und/oder eine Verkehrsblockade Rettungsfahrten behindert 	<ul style="list-style-type: none"> Behinderung von Einsatz-/ Rettungsfahrten

Ein einfaches Brainstorming liefert bereits viele Erkenntnisse zu möglichen Halteorten einerseits und möglichen Kriterien zur Kategorisierung andererseits. Diese Kriterien werden nachfolgend erläutert.

Grundsätzlich muss ein Halteort immer die Möglichkeit zum Verlassen des Fahrzeugs bieten, beispielsweise im Brandfall. Die Türen dürfen unter keinen Umständen, etwa durch harte laterale Begrenzungen, z.B. durch Hauswände, blockiert werden. Harte laterale Begrenzungen sind Teil der Szenerie und werden dadurch gekennzeichnet, dass ein Überfahren nicht möglich ist. Des Weiteren ist beim Aussteigen der Fahrgäste anzustreben, dass diese, wenn möglich, nicht im fließenden Verkehr oder über Radwege aussteigen, sodass keine Kollisionsgefahr mit weiteren Verkehrsteilnehmern besteht.

Weitere Kriterien bezüglich der Wahl von Halteorten beziehen sich häufig auf nachfolgende Fahrzeuge. Diese müssen in der Lage sein, ab dem Zeitpunkt des Sichtbarwerdens des Egofahrzeugs an einem Halteort, durch Brems- oder Ausweichmanöver, eine Kollision zu vermeiden. Da im Worst Case ein Ausweichen auf Grund anderer Fahrzeuge häufig nicht möglich ist, werden mögliche Ausweichmanöver als Kriterium für Halteorte vernachlässigt. Durch Betrachtung des rechtzeitigen Anhaltens folgen zugleich mehrere Kriterien:

- Ab Sichtbarwerden bedeutet, dass die Sichtweite auf das Egofahrzeug für nachfolgende Verkehrsteilnehmer von großer Bedeutung ist. Insbesondere bei Kurvenfahrten ist dies eine entscheidende

Größe und ist selbst von verschiedenen Kriterien abhängig. Wetterbedingungen wie Nebel, Regen und Schneefall haben Einfluss auf die Sicht nachfolgender Verkehrsteilnehmer. Kurven im Stadtverkehr sind häufig durch Gebäude oder andere bauliche Elemente am Straßenrand geprägt, sodass die Sichtweite dadurch beeinflusst wird. Ebenso wirken sich vorhandene Kuppen auf die Sichtweite aus.

- Das rechtzeitige Anhalten bzw. der Anhaltevorgang ist hingegen von der Untergrundbeschaffenheit abhängig, also von Reibungskoeffizienten der Straßenbeläge, sowie von eventuell vorhandener Feuchtigkeit oder Straßenglätte durch nasses Laub, Schnee oder Eis. Des Weiteren wirken sich die Reaktionszeit sowie die Ausgangsgeschwindigkeit auf den Anhalteweg, welcher sich aus Reaktionsweg und Bremsweg zusammensetzt, aus. Die Reaktionszeit hat ihrerseits Einflussfaktoren wie Konzentriertheit des Fahrers, welche durch Schlafmangel oder Rauschmittel, sowie durch Ablenkung beeinflusst wird. Die Geschwindigkeit ist beispielsweise abhängig von Geschwindigkeitszonen, sowie persönlichen Fahrpräferenzen, Wetterbedingungen und dem Verkehrsfluss.

Ein weiteres Kriterium für die Sicherheit von Halteorten bezieht sich auf Sichteinschränkungen, welche durch das Egofahrzeug hervorgerufen werden. Je nach Standort, beispielsweise vor Fußgängerüberwegen oder Radwegen oder durch Stehen im Kreuzungs-/ Einmündungsbereich, kann die Sicht auf Fußgänger, Radfahrer oder andere Verkehrsteilnehmer verdeckt werden, sodass für nachfolgende Verkehrsteilnehmer erhöhte Kollisionsgefahr beim Passieren des Egofahrzeugs besteht. Voraussetzung hierfür ist, dass das Passieren möglich ist. Steht das fahrerlose Fahrzeug beispielsweise im Bereich enger Einbahnstraßen bzw. wird eine solche Straße durch harte laterale Begrenzungen eingeschränkt, sind andere Verkehrsteilnehmer unter Umständen und je nach Fahrzeugbreite nicht in der Lage vorbeizufahren. Eng bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der zur Durchfahrt verbleibende Raum eine Breite von 3,05 Metern, also die höchstzulässige Breite von 2,55 Metern für Kraftfahrzeuge (Kfz) zuzüglich 0,5 Meter Seitenabstand, unterschreitet¹¹⁰. Kraftfahrzeuge sind gemäß §2 Nr.1 der Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr:

„Nicht dauerhaft spurgeführte Landfahrzeuge, die durch Maschinenkraft bewegt werden“¹¹¹.

Eine Blockade wird in dieser Situation dann zu einer möglichen Gefahr, wenn es dazu kommt, dass Einsatz-/ bzw. Rettungsfahrten behindert werden, da diese auf andere Straßen unter Zeitverzögerung ausweichen müssen. Im schlimmsten Fall werden Rettungszufahrten, beispielsweise vor Gebäuden oder Fabriken/Firmen versperrt, sodass der entsprechende Einsatzort nicht erreicht werden kann. Ähnliche Behinderungen entstehen in engen Unter-/ oder Überführungen, absoluten Halteverboten oder allgemein in Bereichen, wo durch Behinderung Staugefahr besteht, etwa auf Kreuzungen, in Kreisverkehren, neben Fahrbahnverengungen wie Verkehrsinseln und Fahrbahnteilern oder auch auf Einfädel-/ oder Ausfädelstreifen.

¹¹⁰ Bundesrecht: Erläuterungen zur StVO (2019).

¹¹¹ BMJV: Verordnung über Fahrzeugzulassung im Straßenverkehr (2011).

Des Weiteren darf nicht auf Schienen, geschweige denn auf Bahnübergängen gehalten werden, da einerseits bei diesen Transportmitteln durch hohe Massen und durch längere Anhaltewege auf Grund von geringen Reibungskoeffizienten zwischen der Materialpaarung Stahl-Stahl¹¹² (Rad und Schiene) potenzielle Kollisionen schwerer ausfallen und andererseits schwerer zu verhindern sind, da kein Ausweichverhalten möglich ist.

Die aus dem Brainstorming abgeleiteten Hauptkriterien werden mit ihren jeweiligen Unterkriterien nachfolgend in Abbildung 3-1 zusammenfassend dargestellt. Die Unterkriterien haben Einfluss auf die Oberkriterien, welche wiederum Einfluss auf die Sicherheit eines Halteortes nehmen.



Abbildung 3-1: Haupt- und Unterkriterien aus dem Brainstorming

¹¹² Strommer, J.: Haftreibungszahlen für Schiene & Straße (2020).

3.1.2 Fehlerbaumanalyse zur Ableitung von Kriterien

Allgemeines Vorgehen einer Fehlerbaumanalyse

Eine weitere Methode zur Identifikation von Kriterien stellt die sogenannte Fehlerbaumanalyse (engl.: Fault-Tree-Analysis – FTA) dar. Diese wird beispielsweise in der DIN EN ISO 14971^{113a} beschrieben:

„Die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis, FTA) ist besonders nützlich bei der Sicherheitstechnik früh in den Entwicklungsstadien, um Gefährdungen und Gefährdungssituationen festzustellen und deren Rangfolge zu bestimmen, wie auch für die Analyse von Vorkommnissen.“^{113b}

Eine Gefährdung im Sinne dieser Arbeit entsteht durch die Auswahl eines risikobehafteten Halteortes, welcher infolge der Systemdegradation *Sicheres Anhalten* eingenommen wurde.

An oberster Stelle des Fehlerbaums steht der Fehler selbst, bzw. eine postulierte unerwünschte Folge. Die Methode stellt einen Top-Down-Ansatz dar. Bei ihrer Verwendung werden ausgehend von einem „top event“ für jede Einzelkomponente deduktiv mögliche Fehlerursachen auf allen Ebenen des Funktionssystems heruntergebrochen. Für die Fehlermöglichkeiten auf niedrigster Ebene besteht dann die Möglichkeit, Risikobeherrschungsmaßnahmen anzuwenden. Die Fehlerbaumanalyse liefert somit Ursachen bzw. im Sinne dieser Arbeit Kriterien, welche Einfluss auf die unerwünschten Folgen eines potenziellen Personenschadens¹¹⁴ oder einer Missionsgefährdung¹¹⁵ haben. Die Methode ist deduktiv, da vom Allgemeinen zum Speziellen vorgegangen wird.^{113c}

Für die die Darstellung der Fehlerbäume in dieser Arbeit sind nachfolgende Symbole relevant:

- Rechtecke stellen Top- oder Zwischenereignisse dar. Ein Top-Ereignis ist die zu ergründende unerwünschte Folge bzw. der Fehler, welche bzw. welcher durch andere Ereignisse ausgelöst wird. Diese anderen Ereignisse münden in der jeweils letzten Ebene in Primärereignissen oder nicht weiter entwickelten Ereignissen.
- Kreise/Ovale stellen Primärereignisse dar, und spiegeln Bedienfehler oder einen Ausfall von Systemkomponenten wider. Bedienfehler im Kontext dieser Arbeit ist das Halten an einem Ort, von welchem eine Gefährdung ausgeht.
- Das ODER-Gatter stellt einen booleschen Operator dar. Wenn ein ODER-Gatter zwischen zwei Ereignissen steht, z.B. zwischen zwei Primärereignissen, muss nur eines der beiden eintreten, damit das übergeordnete Ereignis eintritt. In der nachfolgenden Analyse wird auf die Verwendung des ODER-Gatters auf Grund der Übersichtlichkeit verzichtet. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass es an jeder Stelle zwischen Ereignissen vorhanden ist, da bei den

¹¹³ ISO: DIN EN ISO 14971 (2012). a: -; b: S. 67, c: S. 68.

¹¹⁴ Eine Definition möglicher Schäden bzw. der Schadensschwere wird in Kapitel 4.6.3 gegeben.

¹¹⁵ Eine Definition des Begriffs Missionsgefährdung wird in Kapitel 4.4 gegeben.

durchgeführten Analysen ein Ereignis immer ausreichend ist, damit die unerwünschte Folge eintritt.¹¹⁶

Anwendung und Ergebnisse der Fehlerbaumanalyse im Kontext der Halteort-Problematik

Durch ungünstige Wahl eines Halteortes nach Durchführung des sicheren Anhaltens bestehen potenziell unerwünschte Folgen. Im Kontext dieser Arbeit sind diese Folgen einerseits *unmittelbare und mittelbare Personenschäden* und *andererseits Missionsgefährdungen*.

Unmittelbare Personenschäden entstehen in der Regel durch eine potenzielle Kollision

- *zwischen Fahrzeugen,*
- *zwischen einem Fahrzeug und einem Fußgänger/Radfahrer/oder einem ähnlichen Verkehrsteilnehmer wie bspw. einem E-Scooter-Fahrer oder*
- *zwischen einem Fußgänger und einem Radfahrer/E-Scooter-Fahrer.*

Mittelbare Personenschäden entstehen in der Regel durch die *Behinderung von Einsatz- bzw. Rettungsfahrzeugen* und *Missionsgefährdungen* durch *Behinderung von Omnibussen/Lieferverkehr/Schienenverkehr/weiterer Verkehrsteilnehmer oder durch Behinderung von Straßenarbeiten.*

Auf Grund des Umfangs der Fehlerbaumanalyse wird in nachfolgender Abbildung 3-2 nur eine Übersicht dargestellt, welche die drei Teilbäume für die unerwünschten Folgen und jeweils die erste Ebene der Zwischenereignisse beinhaltet.

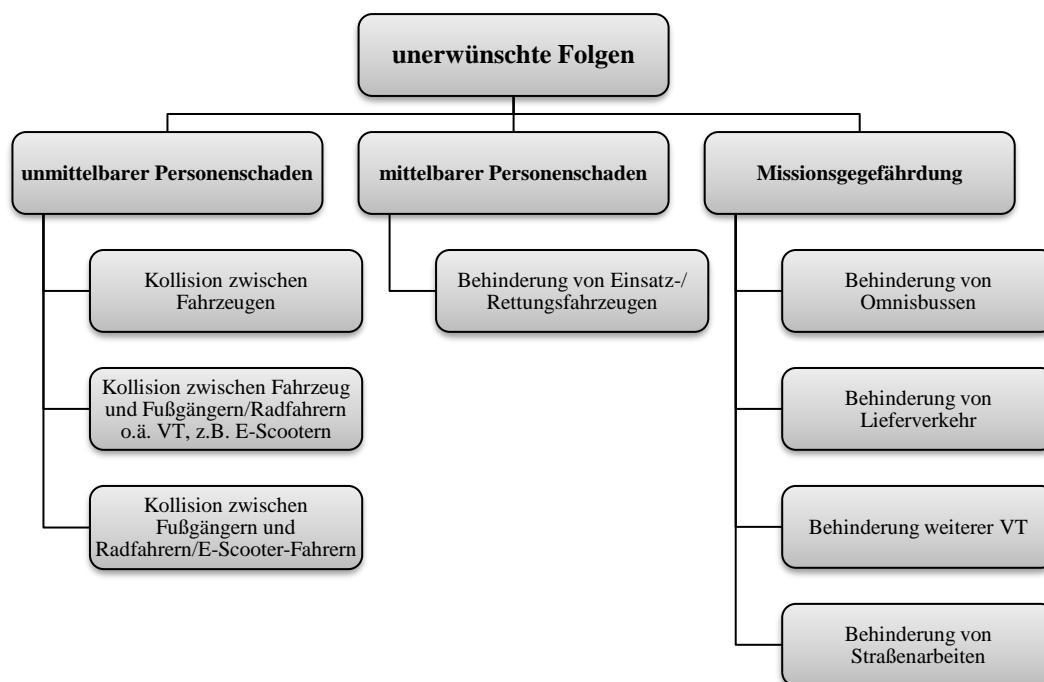


Abbildung 3-2: Übersicht zur Fehlerbaumanalyse für Halteorte

¹¹⁶ Thode, J.: Risikoanalyse-Tools: Fehlerbaumanalyse (FTA) (2017).

Die detaillierten Darstellungen der Bäume für die einzelnen unerwünschten Folgen *unmittelbarer Personenschaden*, *mittelbarer Personenschaden* und *Missionsgefährdung* erfolgen in dieser Reihenfolge in den Anhängen 1, 2 und 3. Wird die Ursachenanalyse für die einzelnen Bäume fortgesetzt, so ergeben sich in letzter Stufe Kriterien, welche die unerwünschten Folgen auf Merkmale des Straßenlayouts zurückführen, an welche der Halteort gebunden ist.

Im Fehlerbaum in Anhang 1 werden die Kollisionen der *unmittelbaren Personenschäden* weiter spezifiziert. Zunächst wird die erste Kategorie der nächst tieferen Ebene betrachtet. Eine *Kollision zwischen Fahrzeugen* entsteht demnach

- auf Grund einer Kollision zwischen Kfz ohne Beteiligung des Egofahrzeugs,
- auf Grund einer Kollision des Egofahrzeugs mit einem anderen Kfz oder
- auf Grund einer Kollision des Egofahrzeugs mit einem Schienenfahrzeug.

Kollisionen zwischen Kfz ohne Beteiligung des Egofahrzeugs entstehen entweder durch

- Sichteinschränkungen durch das Egofahrzeug, welche ihrerseits abhängig sind von den Primärereignissen des Haltens am Straßenrand, auf Fahrstreifen, vor Kurven, vor Kuppen, auf Parkplätzen/Parkstreifen, im Kreuzungs-/Einmündungsbereich oder auf Kreuzungen

oder durch

- Auffahrunfälle, verursacht durch einen Verkehrsstau, beispielsweise durch Halten auf Fahrstreifen im Verkehrsfluss.

Hingegen entstehen Kollisionen mit Beteiligung des Egofahrzeugs und anderen Kfz durch

- Auffahrunfälle, verursacht durch Halten an unübersichtlichen Stellen, beispielsweise innerhalb von Kurven, hinter Kuppen oder in unbeleuchteten Tunneln/Unterführungen.

Eine Kollision zwischen Egofahrzeug und Schienenfahrzeug ist regelmäßig zurückzuführen auf das Halten auf Schienen oder Bahnübergängen.

Die zweite Oberkategorie bei *unmittelbaren Personenschäden* sind *Kollisionen zwischen einem Fahrzeug und Fußgängern, Radfahrern oder ähnlichen Verkehrsteilnehmern wie E-Scooter-Fahrern*. Diese entstehen durch

- das Aussteigen der Fahrzeuginsassen im fließenden Verkehr, wenn beispielsweise nicht am rechten Straßenrand gehalten wird, sondern bei mehreren Fahrstreifen auf weiter links liegenden Fahrstreifen

oder durch

- Ausweichverhalten von Fußgängern, Radfahrern, etc. auf die Fahrbahn, wenn sie das auf dem Fuß- oder Radweg haltende Egofahrzeug passieren wollen

und zuletzt durch

-
- Sichteinschränkungen durch das Egofahrzeug, durch Halten vor Fußgängerüberwegen, vor Radwegen im Kreuzungsbereich oder auch durch Halten auf Parkplätzen oder Parkstreifen, wobei diese Sichteinschränkung prinzipiell durch jedes Fahrzeug besteht.

Schließlich beschreibt die dritte Oberkategorie das Hervorrufen *unmittelbarer Personenschäden* durch *Kollision zwischen Radfahrern und Fußgänger bzw. aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs*, wenn neben einem Radweg angehalten wird und der Verkehr auf dem Radweg beim Aussteigen nicht beachtet wird.

Im zweiten entwickelten Fehlerbaum mit der unerwünschten Folge eines *mittelbaren Personenschadens*, lassen sich die Ursachen auf Primärebene ebenfalls auf Merkmale des Straßenlayouts zurückführen.

So entstehen *mittelbare Personenschäden* auf Grund von *Behinderungen von Rettungs- bzw. Einsatzfahrzeugen*, hervorgerufen durch die Primärereignisse des Haltens im (absoluten) Halteverbot, am Fahrbahnrand enger Straßen bzw. Einbahnstraßen mit harten lateralen Begrenzungen, auf befahrenen Fahrstreifen, in Sackgassen, auf Kreuzungen, in Kreisverkehren, auf Einfädel-/ Ausfädelstreifen, in Rettungsgassen, neben Fahrbahnteilern/Verkehrsinselfen oder vor Rettungszufahrten.

Der Fehlerbaum für *Missionsgefährdungen* (Anhang 3) lässt sich analog zu den beiden anderen entwickeln. Nun werden jedoch keine Kollisionen oder Behinderungen von Rettungsfahrzeugen betrachtet, sondern

- die *Behinderung von Omnibussen* durch Halten auf Busstreifen oder in Bushaltestellen bzw. Bushaltebuchten,
- die *Behinderung von Lieferverkehr* durch Halten in Ladebuchten bzw. Ladezonen,
- die *Behinderung von Schienenfahrzeugen* durch Halten auf Schienen,
- die *Behinderung weiterer Verkehrsteilnehmer*, durch Halten im (absoluten) Halteverbot, in Wendehämmern bzw. Wendekreisen, in engen Sackgassen bzw. Einbahnstraßen, neben Verkehrsinselfen, am Fahrbahnrand, auf Fahrstreifen/Einfädelstreifen/Ausfädelstreifen, auf Kreuzungen, in Kreisverkehren, auf Parkplätzen für Elektrofahrzeuge, auf Behindertenparkplätzen, vor Bordsteinabsenkungen im Kreuzungsbereich, vor Grundstücksausfahrten oder auf Parkstreifen mit geringem Abstand und
- die *Behinderung sonstiger Personen* durch Halten über Schachtdeckeln und der damit möglichen Behinderung der Ausführung notwendiger Arbeiten.

Wie bereits erwähnt beziehen sich die Primärereignisse der Fehlerbaumanalysen im Kontext der sicheren Halteorte auf Merkmale des Straßenlayouts und entsprechen damit nicht einer klassischen FTA, welche die möglichen Fehlerursachen auf allen Ebenen des Funktionssystems für jede Einzelkomponente herunterbricht, um daraus bspw. Sensorausfälle oder Hardwareversagen als Fehlerursachen zu detektieren. Stattdessen wurde bewusst das oben erläuterte Vorgehen gewählt, da im Kontext dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass das sichere Anhalten in jedem Fall eingeleitet wird und

daher ein sicherer Halteort benötigt wird, unabhängig von der tatsächlichen Fehlerursache innerhalb des Funktionssystems. Es besteht daher die Notwendigkeit, halteort- bzw. straßenlayoutbezogene Kriterien bzw. Ursachen in der letzten Ebene der FTA zu identifizieren, welche unerwünschte Folgen hervorrufen.

Sowohl beim Brainstorming als auch bei Durchführung der Fehlerbaumanalyse sind die Ergebnisse subjektiv und keineswegs vollständig. Dennoch sind sie für die Grundlagen der HARA in Kapitel 4 hinreichend genau, um eine Bewertung von Halteorten zu ermöglichen. Mit zunehmender Erfahrung, bzw. anhand erneuter Durchführung mit anderen Personen, besteht die Möglichkeit, die Kriterien sukzessive zu ergänzen.

Auf das Straßenlayout bezogene Kriterien

Die Ergebnisse der durchgeführten Fehlerbaumanalysen werden nachfolgend in Tabelle 3-2 in Form von Kriterien und deren Ausprägungen zusammengefasst. Diese beziehen sich auf das Straßenlayout und haben somit Einfluss auf die Sicherheit von Halteorten, da sie in Kombination mit dem Haltevorgang als Ursache der unerwünschten Folgen identifiziert wurden.

Tabelle 3-2: Auf das Straßenlayout bezogene Kriterien als Ergebnis der Fehlerbaumanalysen

Kriterium	mögliche Ausprägung	Kriterium	mögliche Ausprägung
Kreuzung	vorhanden; fehlend	Kurve	vorhanden; fehlend
Einmündung	vorhanden; fehlend	Kuppe	vorhanden; fehlend
Kreisverkehr	vorhanden; fehlend	Fahrstreifenanzahl	1; 2; ... X
Parkstreifen	vorhanden; fehlend	Fahrbahnanzahl	einbahnig; zweibahnig
Parkplatz	vorhanden; fehlend	Fahrstreifenbreite	0 m ... X m
Gehweg	vorhanden; fehlend	harte laterale Begrenzungen	vorhanden; fehlend
Radweg	vorhanden; fehlend	Tunnel/Unterführung	vorhanden; fehlend
Einfädelstreifen	vorhanden; fehlend	Schienen/Bahnübergang	vorhanden; fehlend
Ausfädelstreifen	vorhanden; fehlend	(absolutes) Halteverbot	vorhanden; fehlend
Fußgängerüberweg	vorhanden; fehlend	Fahrbahnteiler/Verkehrinsel	vorhanden; fehlend
Einbahnstraße	vorhanden; fehlend	Busstreifen	vorhanden; fehlend
Sackgasse	vorhanden; fehlend	Bushaltestelle/Bushaltebucht	vorhanden; fehlend
Wendekreis/Wendehammer	vorhanden; fehlend	Ladezone/Ladebucht	vorhanden; fehlend
Parkplatz für Elektroautos	vorhanden; fehlend	Bordsteinabsenkung	vorhanden; fehlend
Behindertenparkplatz	vorhanden; fehlend	Schachtdeckel	vorhanden; fehlend
Grundstücksausfahrten	vorhanden; fehlend	Rettungszufahrten	vorhanden; fehlend

Mit Hilfe der unterschiedlichen Kriterien aus dem Brainstorming und den hier definierten, auf das Straßenlayout bezogenen Kriterien aus den Fehlerbaumanalysen, lassen sich in Kapitel 4.5 potentiell gefährliche Szenarien durch Kombination verschiedener Kriterien ableiten. Dabei sei an dieser Stelle bereits angemerkt, dass nicht alle Kriterien zur Kombination herangezogen werden, da beispielsweise wetterbezogene Sichtverhältnisse eine sehr detaillierte Betrachtung erfordern und dies den Umfang dieser Arbeit überschreiten würde.

3.2 Identifikation harter Kriterien

In diesem Abschnitt geht es darum, aus den abgeleiteten Kriterien der vorherigen beiden Kapitel harte Kriterien zu identifizieren.

Harte Kriterien müssen hinsichtlich der Auswahl eines Halteortes beim sicheren Anhalten immer erfüllt werden. Dies beruht auf der Zumutbarkeit des Risikos eines Halteortes im Sinne von validen gesellschaftlichen, moralischen Aspekten oder gesetzlichen Regelungen.

Die identifizierten harten Kriterien lauten daher wie folgt:

- Das Halten in Folge einer Systemdegradation auf (beschränkten) Bahnübergängen oder Schienen (z.B. von Straßenbahnen) muss immer vermieden werden. Bahnübergänge werden von Zügen in der Regel mit erhöhter Geschwindigkeit passiert. Zudem ist auf Grund der hohen Massen von Schienenfahrzeugen und des geringeren Reibungskoeffizienten auf Schienen¹¹⁷ im Vergleich zu Straßenfahrzeugen der Anhalteweg wesentlich höher. Somit wird davon ausgegangen, dass es in der Regel nicht möglich ist, bei Sichtbarwerden des Egofahrzeugs rechtzeitig, d.h. ohne Kollision anzuhalten. Mögliche Personenschäden fallen auf Grund der hohen Masse in der Regel zudem höher aus als bei Pkw-Unfällen, sodass aus gesellschaftlich moralischen Aspekten das Halten an solchen Orten nicht in Frage kommt.
- Ein weiteres identifiziertes Kriterium stellt das Halten auf Kreuzungen bzw. Einmündungen dar. Nach §11 Nr. 1 StVO darf nicht auf Kreuzungen/Einmündungen eingefahren werden, wenn auf diesen gewartet werden müsste. Daraus folgt, dass dies ebenfalls ein hartes Kriterium darstellt, das immer erfüllt werden muss, da ein Warten kein Halten im Sinne einer gewollten Fahrtunterbrechung darstellt und somit eine Kreuzung oder eine Einmündung immer geräumt werden muss.¹¹⁸
- Des Weiteren stellt ein Halteort innerhalb einer Rettungsgasse ein Ausschlusskriterium dar, da sich bei deren Bildung in der Regel schon Einsatz- bzw. Rettungsfahrzeuge nähern, um bspw. an einen Unfallort zu gelangen und diese nicht behindert werden dürfen.
- Das letzte harte Kriterium richtet sich an das Halten vor/in amtlich gekennzeichneten Feuerwehrezufahrten.¹¹⁹ Gerade hinsichtlich bestimmter Fabriken oder Firmen, bspw. in der Chemiebranche, welche z.T. eigene Werksfeuerwehren besitzen, spielt es eine wichtige Rolle, keine Zu- bzw. Ausfahrten zu blockieren. Gleiches gilt beispielsweise für die Zufahrten von Mehrfamilienhäusern, Krankenhäusern, Feuerwehren, Polizeistationen oder Sportstätten, wo ein erhöhtes Einsatzrisiko herrscht.

Alle weiteren identifizierten Kriterien ausgehend von den beiden Methoden bedürfen einer näheren Untersuchung innerhalb der HARA für Halteorte, da diese nicht von vornherein dazu dienen, Halteorte auszuschließen. Beispielsweise kann das Halten in einer Kurve je nach Kurvenart sowohl ein unzumutbares als auch ein noch zumutbares Risiko darstellen, sodass eine differenzierte Betrachtung notwendig ist.

¹¹⁷ Strommer, J.: Haftreibungszahlen für Schiene & Straße (2020).

¹¹⁸ BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) (2013).

¹¹⁹ BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) (2013).

Es ergeben sich demnach vier harte Kriterien, die dazu dienen, ohne Durchführung der Gefahrenanalyse und Risikobewertung in Kapitel 4, mögliche Halteorte auszuschließen. Es ist unter keinen Umständen gestattet, auf Bahnübergängen/Schienen, auf Kreuzungen/Einmündungen, in Rettungsgassen oder vor/in amtlich gekennzeichneten Feuerwehruzufahrten und ähnlichen Zu-/ Ausfahrten in Folge eines Nothaltemanövers anzuhalten. Die möglichen Zielstandorte des sicheren Anhaltens werden also schon von vornherein um diese Halteorte eingeschränkt.

Weitere gesetzliche Regelungen beziehen sich beispielsweise auf Verbote des Haltens oder Parkens, woraus sich jedoch keine weiteren harten Kriterien ergeben, da das Halten nach der VwV-StVO zu §12

„eine gewollte Fahrtunterbrechung [darstellt], die nicht durch die Verkehrslage oder eine Anordnung veranlasst ist“¹²⁰.

Da ein Nothaltemanöver jedoch ungewollt stattfindet, ist das Gesetz in diesem Sinne nicht anwendbar. Das Parken, also das Verlassen des Fahrzeugs oder das Halten von länger als drei Minuten ist ebenfalls eine gewollte Fahrtunterbrechung, sodass sich daraus ebenfalls keine weiteren harten Kriterien ergeben. Stattdessen ergeben sich Kriterien hoher Priorität, deren Erfüllung angestrebt wird, wenn es der Systemzustand des Fahrzeugs zulässt. Diese Kriterien werden im nachfolgenden Kapitel zusammenfassend dargestellt.

3.3 Identifikation von Kriterien hoher Priorität

Wie bereits erwähnt lassen sich aus gesetzlichen Regelungen hinsichtlich des Parkens und Haltens Kriterien hoher Priorität ableiten, deren Erfüllung erstrebenswert ist.

Zu diesen Kriterien gehören auf Grund gesetzlicher Verbote das Vermeiden des Haltens

- in zweiter Reihe¹²¹,
- in absoluten Halteverboten (Anlage 2, Abschnitt 8 StVO),
- an schmalen unübersichtlichen Straßenstellen (§11 Nr. 2 StVO),
- im Bereich scharfer Kurven,
- auf Einfädel-/Ausfädelstreifen,
- auf Bahnübergängen (hartes Kriterium) und
- vor/in amtlich gekennzeichneten Feuerwehruzufahrten (hartes Kriterium).¹²²

¹²⁰ BMVI: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) (2017).

¹²¹ Zollner, P.; Henn, C.: StVO-Novelle: Neue Regeln und Strafen | ADAC (2020).

¹²² BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) (2013).

Auf Grund gesetzlicher Verbote hinsichtlich des Parkens werden als Kriterien identifiziert, das Vermeiden des Haltens

- auf Geh- und Radwegen mit Behinderung¹²³,
- sowie nach §11 Nr. 3 StVO im Abstand von 5 Metern von den Schnittpunkten der Fahrbahnkanten vor und hinter Kreuzungen/Einmündungen (bzw. mit Inkrafttreten der Neuerungen der StVO am 28.04.2020 im Abstand von 8 Metern bei baulich angelegtem Radweg auf der rechten Fahrbahnseite¹²³),
- vor Bordsteinabsenkungen,
- auf Schachtdeckeln, wenn das Parken auf Gehwegen erlaubt ist,
- vor Grundstückseinfahrten/-ausfahrten bzw. an engen Stellen auch diesen gegenüber und
- an Stellen, wo die Nutzung gekennzeichnete Parkflächen verhindert wird.¹²⁴

Zuletzt stellt die Behinderung von Rettungsfahrzeugen ein gesetzliches Verbot dar, d.h. diesen ist bei Blaulichtfahrt freie Bahn zu verschaffen¹²³. Bildet sich eine Rettungsgasse und kommt es während dieses Zeitraums zum sicheren Anhalten, so besteht das Erfordernis diese zu räumen, da eine Behinderung sehr wahrscheinlich ist. Es handelt sich daher wie erwähnt um ein hartes Kriterium. Ist hingegen allgemein eine Behinderung von Rettungsfahrten möglich, jedoch ohne ein sich konkret näherndes Fahrzeug in einer Rettungsgasse, so ist dieses Szenario weniger wahrscheinlich, sodass nur ein Kriterium hoher Priorität besteht.

Im Gegensatz zu den harten Kriterien, welche in jedem Fall erfüllt werden müssen und damit bereits ohne Gefahrenanalyse und Risikobewertung Halteorte ausschließen, werden die hier erwähnten Kriterien hoher Priorität in die HARA in Kapitel 4 eingebunden und getrennt in den jeweiligen Szenarien bzw. Missionsgefährdungen bewertet.

3.4 Zusammenfassung hinsichtlich der Kriterien von Halteorten

Im dritten Kapitel wurden verschiedene Erkenntnisse hinsichtlich möglicher Kriterien beim Sicherheitsverständnis von Halteorten gewonnen. Durch Anwendung eines Brainstormings (3.1.1) und Durchführung einer Fehlerbaumanalyse (3.1.2), bzw. genauer gesagt Durchführung dreier Analysen für drei unerwünschte Folgen, wurden zahlreiche Kriterien identifiziert und kategorisiert. Diese identifizierten Kriterien sind auf Grund der Subjektivität bei der Methodenanwendung jedoch nicht taxativ.

Zu den identifizierten Hauptkriterien aus dem Brainstorming zählen das *Verlassen des Egofahrzeugs*, die *Sichtbarkeit des Egofahrzeugs, der Anhalteweg nachfolgender Fahrzeuge*, die *Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug*, die *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug* und das *Vorhanden-*

¹²³ Zollner, P.; Henn, C.: StVO-Novelle: Neue Regeln und Strafen | ADAC (2020).

¹²⁴ BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) (2013).

sein von Schienenverkehr. Diese Hauptkriterien dienen größtenteils im vierten Kapitel als Ausgangslage für Kategorien der angepassten HARA für Halteorte. Innerhalb einer Kategorie, bspw. der Kategorie *Verlassen des Egofahrzeugs* werden dann mit Hilfe der Unterkriterien und den weiteren, aufs Straßenlayout bezogenen Kriterien der Fehlerbaumanalysen, gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen formuliert. Das Hauptkriterium *Anhalteweg nachfolgender Fahrzeuge* lässt sich zusätzlich mit den Hauptkriterien *Verlassen des Egofahrzeugs*, *Sichtbarkeit des Egofahrzeugs* und *Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug* kombinieren. Das genaue Vorgehen wird dazu in Kapitel 4.5 erläutert.

Des Weiteren dienen die identifizierten harten Kriterien (3.2) als Ausschlusskriterium für Halteorte, sodass diese unter keinen Umständen sichere Halteorte darstellen und eine Betrachtung in der Gefahrenanalyse und Risikobewertung nicht mehr notwendig ist. Die Kriterien hoher Priorität hingegen (3.3), welche insbesondere aus gesetzlichen Vorgaben resultieren, werden in der HARA besonders berücksichtigt. Zwar beziehen sich die Gesetze nicht explizit auf das Liegenbleiben von Fahrzeugen, sondern auf eine gewollte Fahrtunterbrechung durch Halten oder Parken, dennoch werden diese im Kontext des sicheren Anhaltens als sinnvoll erachtet und daher innerhalb der zweigeteilten HARA bei gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen berücksichtigt.

4 Entwicklung einer Methodik zur Identifikation sicherer Halteorte

Das vierte Kapitel der vorliegenden Thesis dient dazu, aufbauend auf den Definitionen und Kriterien der vorherigen Kapitel, eine Methode zu entwickeln, anhand der es möglich ist, sichere Halteorte für Nothaltemanöver zu identifizieren. Dazu wird nachfolgend auf Grundlage der ISO 26262¹²⁵ mit Fokus auf dem dritten Teil der Norm¹²⁶ das Vorgehen einer Gefahrenanalyse und Risikobewertung (engl.: hazard analysis and risk assessment – HARA) erläutert (4.1), um darauf aufbauend diese Methode auf die Problemstellung im Kontext sicherer Halteorte anzupassen (4.2). Dazu besteht die Notwendigkeit, den Begriff des gefährlichen Szenarios zu definieren (4.3), um darunter die in der Fehlerbaumanalyse analysierten unerwünschten Folgen mit potenziellem Personenschaden zu erfassen. Des Weiteren wird der Begriff der Missionsgefährdung definiert (4.4) unter welchem verschiedene (Verkehrs-)Behinderungen erfasst werden. Im Anschluss daran erfolgt auf Grundlage der Definitionen und der Kriterien aus Kapitel 3 die Ableitung potenziell gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen in Folge der Wahl eines Halteortes (4.5).

Die Dimensionen Kontrollierbarkeit, Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere zur Durchführung der Risikobewertung werden in Kapitel 4.6 angepasst und genau spezifiziert, um darauf aufbauend den potenziell gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen Rationale zuzuordnen und diese zu bewerten (4.7). Zuletzt werden daraus die entsprechenden Risikolevel für die möglichen Halteorte festgelegt und damit eine Aussage über die Sicherheit getroffen (4.8).

Die entwickelte Methodik wird anschließend in Kapitel 5 exemplarisch auf einen identifizierten Streckenabschnitt angewendet und ihre Tauglichkeit untersucht.

4.1 Erläuterung der HARA nach ISO 26262

Die nachfolgenden Erläuterungen beziehen sich ausschließlich auf die ISO 26262¹²⁵. Daher wird auf Grund der Übersichtlichkeit in diesem Textteil, mit Ausnahme von Tabellen, auf weiteres Zitieren verzichtet.

Das Ziel der genannten Norm besteht im Erreichen von funktionaler Sicherheit im Kontext elektrischer und elektronischer Systeme bei Fahrzeugen. Der Fokus liegt jedoch nicht explizit auf fahrerlosen Fahrzeugen, sondern auf Automatisierung im Allgemeinen und betrifft bspw. auch die funktionale Sicherheit von Fahrerassistenzsystemen.

In der Norm wird das Vorgehen einer HARA beschrieben, deren Zweck es ist, gefährliche Ereignisse zu identifizieren und zu klassifizieren, welche auf fehlerhaftes Verhalten einzelner Systeme zurückzuführen sind. Diesen Ereignissen werden im Anschluss daran „*Automotive Safety Integrity*

¹²⁵ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

¹²⁶ ISO: ISO 26262-3:2018 (2018).

Level“ (ASIL) zugeordnet. Je nach Level werden Sicherheitsziele für die Systeme (engl: items) definiert, die dazu dienen, gefährliche Ereignisse zu vermeiden oder zu mindern, damit keine unzumutbaren Risiken auftreten.

Das Vorgehen der HARA geht von einer genauen Definition der einzelnen Items aus, wobei ein Item im Allgemeinen, wie bereits im zweiten Kapitel in Abbildung 2-1 dargestellt, ein System oder eine Kombination von Systemen bezeichnet, auf welche die ISO 26262 ausgerichtet ist. Diese Systeme implementieren Funktionen auf Fahrzeugebene und bestehen aus mehreren Komponenten oder Subsystemen. Zudem beinhalten sie mindestens einen Sensor, einen Aktuator und ein Steuergerät.

Auf Grundlage der Definitionen der einzelnen Systeme bzw. Items werden operationale Situationen und Betriebsmodi beschrieben, in welchen die Möglichkeit besteht, dass die Fehlfunktion eines Items gefährliche Ereignisse hervorruft. Nicht betrachtet werden gefährliche Ereignisse, die im Normalzustand des Systems auftreten. Stattdessen erfolgt dies, wie bereits erwähnt, im Rahmen der Untersuchung der Verhaltenssicherheit (2.2.3) und nicht im Rahmen der funktionalen Sicherheit (2.2.2).

Nachdem die gefährlichen Ereignisse identifiziert wurden, erfolgt deren Klassifizierung anhand der Dimensionen

- der Schwere eines potenziellen Schadens,
- der Auftretenswahrscheinlichkeit und
- der Kontrollierbarkeit,

wobei eine konservative Einteilung bei vorhandener Unsicherheit bezüglich der Klassifizierung angewendet wird.

Die Schadensschwere (engl.: severity – Abkürzung: S) bezieht sich ausschließlich auf potenzielle Personenschäden hinsichtlich aller beteiligten Personen, durch ein gefährliches Ereignis, in einer Situation. Die Klassifizierung erfolgt anhand der Zuordnung von Rationalen und anschließender Einteilung in die Kategorien *S0: keine Verletzungen*, *S1: leichte bis mittlere Verletzungen*, *S2: schwere bis lebensbedrohliche Verletzungen* oder *S3: lebensbedrohliche bis fatale Verletzungen*. Erfolgt eine Klassifizierung mit der Einstufung *S0*, so ist kein ASIL zuzuordnen, da nur ein Materialschaden zu erwarten ist. Anhaltspunkte zur Verletzungsschwere, insbesondere hinsichtlich verschiedener Unfallarten und Beispiele sind dem Anhang 3 der ISO 26262-3 zu entnehmen.

Die zweite Dimension der Klassifizierung gefährlicher Ereignisse beschreibt deren Auftretenswahrscheinlichkeit (engl.: probability of exposure – Abkürzung: E). Ebenfalls basierend auf definierten Rationalen werden den gefährlichen Ereignissen die Kategorien *E0: unmöglich*, *E1: sehr geringe Wahrscheinlichkeit*, *E2: geringe Wahrscheinlichkeit*, *E3: mittlere Wahrscheinlichkeit* oder *E4: hohe Wahrscheinlichkeit* zugeordnet. Im Fall einer *E0-Einstufung*, beispielsweise bei der Auftretenswahrscheinlichkeit höherer Gewalt, wird ebenfalls kein ASIL zugeordnet und es müssen keine Sicherheitsziele festgelegt werden.

Die letzte Dimension bezieht sich auf die Kontrollierbarkeit (engl.: controllability – Abkürzung: C) durch den Fahrer oder andere beteiligte Personen bei Eintritt eines gefährlichen Ereignisses. Nach der Definition von Rationalen werden den Ereignissen die Stufen *C0: im Allgemeinen kontrollierbar*,

C1: leicht kontrollierbar, C2: normal kontrollierbar oder C3: schwer kontrollierbar zugeordnet. Für ein Ereignis erfolgt bspw. eine *C0-Zuordnung*, wenn durch routinemäßiges Handeln des Fahrers ein Unfall vermieden werden kann. Daher bedarf es in diesem Fall weder einer ASIL Zuordnung, noch einer Definition von Sicherheitszielen. An dieser Stelle wird wie erwähnt deutlich, dass die Norm nicht explizit auf fahrerlose Fahrzeuge ausgelegt ist, da ein handelnder Fahrer erwähnt wird.

Die ASIL-Zuordnung erfolgt nach der Zuordnung von Rationalen und der beschriebenen Kategorisierung einzelner gefährlicher Ereignisse anhand nachfolgender Tabelle 4-1:

Tabelle 4-1: ASIL-Zuordnung in Anlehnung an ISO 26262-3¹²⁷

Schadensschwere	Auftretenswahr.	Kontrollierbarkeit		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

Die Bestimmung der Sicherheitsziele als höchste Ebene von Sicherheitserfordernissen wird aufbauend auf der ASIL Klassifizierung vorgenommen. Das genaue Vorgehen ist jedoch für den weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht relevant und wird daher nicht näher erläutert.

Mit diesen Erkenntnissen bezüglich der Durchführung einer HARA im Kontext von elektrischen/elektronischen Systemen in Fahrzeugen und Schwerpunkt der Automatisierung, besteht die Möglichkeit, nachfolgend notwendige Anpassungen durchzuführen, um die HARA zur Identifikation sicherer Halteorte zu verwenden.

4.2 Anpassung der HARA zur Klassifizierung von Halteorten

Zur Verwendung der HARA nach ISO 26262¹²⁸ für die Identifikation von sicheren Orten für Nothaltemanöver, sind verschiedene Anpassungen notwendig. Aus der Fehlerbaumanalyse geht hervor, dass sich mögliche unerwünschte Folgen einerseits auf Personenschäden beziehen, welche in Verbindung mit Kollisionen oder Behinderungen auftreten und andererseits auf Missionsgefährdungen, wenn andere Verkehrsteilnehmer in der Erreichung ihrer (Fahr-)Mission beeinträchtigt werden. Daher wird die HARA im Sinne von Halteorten zweigeteilt durchgeführt.

¹²⁷ ISO: ISO 26262-3:2018 (2018), S. 10.

¹²⁸ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

Im ersten Teil werden potenziell gefährliche Szenarien betrachtet, deren Definition in Kapitel 4.3 erfolgt. Da diese Szenarien mögliche Personenschäden berücksichtigen, beziehen sich die Dimensionen des Risikos, also die Kontrollierbarkeit, Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere ebenfalls auf diese Art von Schäden.

Im zweiten Teil der angepassten HARA werden anschließend Missionsgefährdungen betrachtet, wozu die Definition in Kapitel 4.4 gegeben wird. Da Missionsgefährdungen jedoch ohne Personenschäden einhergehen, ergeben sich für die Risikodimensionen in diesem Fall andere Definitionen und Spezifizierungen als im ersten Teil.

Eine genaue Spezifizierung und Abgrenzung der Risikodimensionen zur Durchführung der zweigeteilten Analyse wird in den Kapiteln 4.6.1 – 4.6.3 durchgeführt. Anstatt der englischen Abkürzungen werden die Anfangsbuchstaben der deutschsprachigen Begriffe für die Risikodimensionen verwendet (Schadensschwere – S, Auftretenswahrscheinlichkeit – A, Kontrollierbarkeit – K). Ebenfalls werden in diesen Kapiteln Spezifizierungen gegeben, die eine Klassifizierung bzw. eine Zuordnung der Kategorien *S0 – S3*, *A0 – A4* und *K0 – K3* ermöglichen, um daraus dann ein Risikolevel in Anlehnung an Tabelle 4-1 zuzuordnen. Dieses Risikolevel wird in Kapitel 4.8. definiert und eine Abgrenzung zum ursprünglichen ASIL durchgeführt.

Auf Grundlage des Risikolevels wird eine Aussage über die Sicherheit von Halteorten getroffen. Das Ergebnis dient theoretisch zusätzlich als Grundlage zur Durchführung eines Risikoabgleichs zwischen der Sicherheit eines Halteortes selbst und dem Risiko zur Erreichung dieses Ortes. Dieser Abgleich ist jedoch nicht Thema dieser Thesis.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass einige Anpassungen notwendig sind, um die HARA auf die Halteort-Problematik anzuwenden. Die dazu notwendigen Definitionen und Spezifizierungen werden daher in den nachfolgenden Kapiteln dargelegt.

4.3 Definition und Abgrenzung eines gefährlichen Szenarios

Im Gegensatz zu der in der ISO 26262^{129a} beschriebenen HARA, wird bei der Durchführung der angepassten HARA in dieser Arbeit nicht der Begriff gefährliches Event/Ereignis (engl.: hazardous event^{129b}) verwendet.

Definitionsgemäß handelt es sich nach ISO bei einem gefährlichen Ereignis um die Kombination einer Gefährdung und einer operationalen Situation, wobei eine operationale Situation ein Szenario darstellt, das während des Lebenszyklus eines Fahrzeugs auftreten kann.^{129b}

Diese Definition setzt dabei die Begriffe Szenario und Situation gleich, obwohl, wie in Kapitel 2.3.2 erläutert, eine Differenzierung möglich ist. Daher wird in dieser Arbeit der Begriff *des gefährlichen Szenarios* verwendet, um Mehrdeutigkeiten auszuschließen.

¹²⁹ ISO: ISO 26262:2018 (2018). a: -; b: S. 15.

Der erste Bestandteil des Wortpaares eines gefährlichen Szenarios wird zurückgeführt auf die Definition einer Gefährdung. Gefährlich ist ein Szenario dann, wenn das Risiko innerhalb dieses Szenarios, ausgehend vom gewählten Halteort, auf ein höheres Niveau steigt als das zumutbare Grenzkrisiko, d.h. dass die Gefahr eines mittelbaren oder unmittelbaren Personenschadens besteht. Das Grenzkrisiko wird durch die angepasste HARA bestimmt. Eine Überschreitung tritt ein, wenn das Risikolevel mit A, B, C oder D bewertet wird.¹³⁰ Vor Durchführung dieser Bewertung kann allenfalls von einem potenziell gefährlichen Szenario gesprochen werden, da erst die Überschreitung des zumutbaren Risikos eine Gefährdung begründet.

Das Szenario als zweiter Bestandteil des Wortpaares beschreibt, wie bereits erwähnt, die zeitliche Entwicklung von Szenenelementen innerhalb einer Folge von Szenen, welche durch Aktionen und Ereignisse miteinander verknüpft werden und erstreckt sich somit über eine bestimmte Zeitspanne. Bei der Durchführung der HARA wird auf die Definition der objektiven Szene abgestellt, welche eine Momentaufnahme des Umfelds mit Szenerie, dynamischen Elementen und Selbstrepräsentation der Akteure und Beobachter darstellt. Diese objektive Sichtweise ist für die Durchführung einer Gefährdungsanalyse notwendig.

Im Gegensatz zur hier beschriebenen Definition eines Szenarios ist eine operationale Situation und damit ein gefährliches Ereignis immer subjektiv, da die Situation aus der subjektiven Szene durch einen Prozess der Informationsauswahl und -augmentierung abgeleitet wird. Diese subjektive Sichtweise ist hier nicht zweckmäßig, sodass die erwähnte Begriffsanpassung durchgeführt wird. Gleicher Ansicht sind beispielsweise auch Stolte et al.¹³¹, welche die Definition des gefährlichen Szenarios bei der Durchführung einer HARA im Projekt eines automatisierten und fahrerlosen Sicherheitsfahrzeugs verwenden.

Die Definition eines potenziell gefährlichen Szenarios lautet daher wie folgt:

Ein potenziell gefährliches Szenario ist die Verknüpfung mehrerer objektiver Szenenelemente durch Aktionen und Ereignisse. Diese Verknüpfung geht mit einer potenziellen Überschreitung des zumutbaren Risikos hinsichtlich des Hervorrufens unmittelbarer oder mittelbarer Personenschäden einher.

4.4 Definition einer Missionsgefährdung

Der Begriff der *Missionsgefährdung* ist für den zweiten Teil der HARA relevant und bezieht sich auf die identifizierten unerwünschten Folgen der Fehlerbaumanalyse, welche nicht mit einem Personenschaden einhergehen.

Das Wort lässt sich trennen in die Bestandteile Mission und Gefährdung, wobei eine Mission beispielsweise im DUDEN definiert wird als

„(mit einer Entsendung verbundener) Auftrag; Sendung“¹³².

¹³⁰ Eine Definition des Risikolevels wird in Kapitel 4.8 gegeben.

¹³¹ Stolte, T. et al.: HARA for an automated vehicle (2017).

¹³² DUDEN: Mission (2020).

Bezogen auf das automatisierte Fahren

„[besteht] die Mission [...] immer aus einer Transportaufgabe von einem Standort A zu einem Standort B mit Transport von Gütern, Personen oder nur dem Fahrzeug selbst.“¹³³

Im Kontext dieser Arbeit werden beide Definitionen miteinander kombiniert.

- Eine Mission stellt eine Transportaufgabe gemäß der zweiten Definition dar. Das bedeutet, dass das Fahrtziel von Verkehrsteilnehmern im Transport von Personen oder Gütern von einem zum anderen Ort besteht. Dabei muss es sich jedoch nicht zwingend um automatisierte Fahrzeug handeln. Auch Fahrer herkömmlicher Kfz haben das Ziel, sich selbst, andere Personen oder Güter zu transportieren (Personenbeförderungs- und Lieferverkehr).
- Gemäß der DUDEN-Definition umfasst der Begriff in dieser Arbeit zusätzlich nicht nur Transportaufgaben von Personen und Gütern, sondern auch andere mit Entsendung verbundene Aufträge, wie beispielsweise die Durchführung notwendiger Arbeiten, durch von einem Auftragsgeber entsandte Arbeiter (z.B. Straßen-/Kanalarbeiten).

Der zweite Bestandteil des Begriffspaars bezeichnet eine Gefährdung. Diese liegt im Sinne dieser Arbeit vor, wenn nach Ausführung des sicheren Anhaltens das von einem fahrerlosen und am Halteort stehenden Fahrzeug ausgehende Risiko ein definiertes Grenzkrisiko überschreitet. Das Grenzkrisiko wird mit Durchführung der angepassten HARA bestimmt und wird überschritten, wenn dem Halteort das Risikolevel A, B, C oder D zugeordnet wird.

Eine potenzielle Missionsgefährdung liegt demnach vor, wenn das zumutbare Risiko hinsichtlich Personenbeförderungsverkehr, Lieferverkehr oder Aufträgen mit Entsendung (von Arbeitern) potenziell überschritten wird, sodass diese Missionen nicht oder nur mit Umwegen und/oder Zeitverlusten durchgeführt werden können.

Potenziell bedeutet in diesem Kontext, dass die Möglichkeit besteht, dass das Grenzkrisiko überschritten wird. Nur bei tatsächlicher Überschreitung hingegen liegt eine Missionsgefährdung vor.

Die grundlegenden Definitionen zur Zweiteilung der HARA sind mit den erläuterten Begriffen des gefährlichen Szenarios und der Missionsgefährdung nun gegeben. Darauf aufbauend werden die drei Risikodimensionen der Kontrollierbarkeit, Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere im nachfolgenden Kapitel erläutert und für die geteilte Durchführung voneinander differenziert.

4.5 Ableitung potenziell gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen

Wie bereits im dritten Kapitel erwähnt, zählen zu den sechs identifizierten Hauptkriterien des Brainstormings das *Verlassen des Egofahrzeugs*, die *Sichtbarkeit des Egofahrzeugs*, der *Anhalteweg nachfolgender Fahrzeuge*, die *Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug*, die *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug* und das *Vorhandensein von Schienenverkehr*. Mit Hilfe der auf das Stra-

¹³³ Matthei, R. et al.: Autonomes Fahren (2015).

ßenlayout bezogenen Kriterien der Fehlerbaumanalysen besteht die Möglichkeit, gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen zu formulieren. Dazu werden Haupt- und zugehörige Unterkriterien des Brainstormings mit den straßenlayoutbezogenen Kriterien kombiniert.

Auf Grund der identifizierten harten Kriterien ist es nicht notwendig, das mögliche Halten auf Bahnübergängen/Schienen, auf Kreuzungen/Einmündungen, in Rettungsgassen oder vor/in amtlich gekennzeichneten Feuerwehrezufahrten und ähnlichen Zu-/ Ausfahrten zu betrachten, da dies keine potenziellen Halteorte darstellt. Das Hauptkriterium *vorhandener Schienenverkehr* und die auf das Straßenlayout bezogenen Kriterien *vorhandene Kreuzung/Einmündung* und *vorhandene Rettungszufahrten* werden daher im weiteren Vorgehen nicht näher untersucht.

Stattdessen liegt der Fokus auf den vier Hauptkriterien *Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug*, *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug*, *Verlassen des Egofahrzeugs* und *Sichtbarkeit des Egofahrzeugs*. Diese dienen zugleich als Kategorien, innerhalb derer durch Kombination mit

- den Unterkriterien sowie mit
- dem Hauptkriterium des *Anhaltewegs* und
- den Straßenlayout-Kriterien

potenziell gefährliche Szenarien abgeleitet werden. Nachfolgende Tabelle 4-2 verdeutlicht schematisch diese vier Kategorien der Hauptkriterien innerhalb der HARA.

Tabelle 4-2: Schematische Darstellung der Kategorien zur Identifikation gefährlicher Szenarien

Potenziell gefährliches Szenario	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	Risikolevel
1. Auf Grund von Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug...							
...							
2. Eine Blockade durch das Egofahrzeug...							
...							
3. Beim Verlassen des Egofahrzeugs...							
...							
4. Durch eingeschränkte Sichtbarkeit des Egofahrzeugs...							
...							

Bei den potenziellen Missionsgefährdungen ist nur das Hauptkriterium *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug* als Kategorie relevant, innerhalb der durch Kombination von Kriterien Missionsgefährdungen formuliert werden.

Nicht in der zweigeteilten HARA betrachtet werden in Bezug auf die Hauptkategorie *Sichtbarkeit des Egofahrzeugs* sowohl *Wetterbedingungen* als auch *Kuppen*. Es wird die Annahme getroffen, dass die fahrerlosen Fahrzeuge nur unter Bedingungen eingesetzt werden, in denen die Sensoren und Kamerasysteme einwandfrei funktionieren, sodass im Fall eines Systemversagens die Wetterbedingungen keine Berücksichtigung erfordern. Selbst wenn das Egofahrzeug bei plötzlich eintretenden veränderten Sichtverhältnissen auf Grund des Wetter operiert oder sogar deshalb das sichere Anhalten einleitet, wird davon ausgegangen, dass sich auch die anderen Verkehrsteilnehmer entsprechend den Sichtverhältnissen verhalten und ihre Geschwindigkeiten und Sicherheitsabstände anpassen.

Die Kategorie *vorhandene Kuppen* wird in dieser Arbeit ebenfalls nicht betrachtet. Einerseits wäre die Entwicklung eines Sichtweitenmodells erforderlich, welches vorhandene Kuppenhalbmesser sowie die Augpunkt- und Zielpunkthöhe zwischen dem Fahrer des Folgefahrzeugs und dem Egofahrzeug berücksichtigt. Andererseits spielen Kuppen im städtischen Verkehr eine eher untergeordnete Rolle, da die Relativgeschwindigkeiten im Vergleich zu Landstraßen gering sind und die Häufigkeit des Vorkommens ebenfalls eher gering ist, wenn reale Gegebenheiten in Deutschland, bspw. in Darmstadt, betrachtet werden.

Insgesamt wurden 40 gefährliche Szenarien und 24 Missionsgefährdungen innerhalb der HARA für Halteorte abgeleitet. Da es nicht zweckmäßig ist, alle Kombinationen von Kriterien zu erläutern, wird in diesem Kapitel nur das Vorgehen anhand ausgewählter Beispiele dargestellt. Die beiden vollständig entwickelten Tabellen jedoch, welche insbesondere auch die Kriterien hoher Priorität berücksichtigen, werden in Anhang 4 und Anhang 5 dargestellt.

Auf Grund der subjektiven Herleitung der Kriterien und der subjektiven Ableitung möglicher gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen wird darauf hingewiesen, dass diese Tabellen nur einen möglichst umfassenden Überblick geben, jedoch nicht taxativ sind. Das bedeutet, dass mittels erneuter Durchführung eines Brainstormings bzw. der Fehlerbaumanalysen (durch andere Personen) sich durchaus weitere Kriterien ergeben, anhand derer die Möglichkeit besteht, die Listen mittels der hier vorgestellten Methodik sukzessive zu erweitern.

Nachfolgend werden einige Beispiele zur Herleitung gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen dargelegt.

Mögliche Beispiele zur Herleitung potenziell gefährlicher Szenarien

Aus dem Hauptkriterium *Verlassen des Egofahrzeugs*, welches zugleich als Kategorie gefährlicher Szenarien dient, ergeben sich beispielsweise mit den Unterkriterien des *Verkehrsflusses* und der *Relativgeschwindigkeit* sowie den Straßenlayout-Kriterien eines *vorhandenen Radweges*, der *Fahrstreifenanzahl* und den möglichen *harten lateralen Begrenzungen* folgende gefährliche Szenarien:

- *Beim Verlassen des Egofahrzeugs auf aktiven Fahrstreifen kommt es auf Grund zu später Wahrnehmung zwischen nachfolgenden Fahrzeugen und aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs zu einer Kollision. Grund dafür ist, dass das Egofahrzeug auf links liegenden Fahrstreifen anhält, wenn mehrere Fahrstreifen in einer Richtung vorhanden sind. (Szenario wird für geringe und mittlere Geschwindigkeiten betrachtet¹³⁴)*
- *Beim Verlassen des Egofahrzeugs auf aktiven Fahrstreifen kommt es auf Grund zu später Wahrnehmung zwischen nachfolgenden Fahrzeugen und aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs zu einer Kollision. Grund dafür ist, dass das Egofahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen anhält, jedoch ein Aussteigen am rechten Fahrbahnrand auf Grund baulicher Gegebenheiten/harter lateraler Begrenzungen nicht möglich ist. (Szenario wird für geringe und mittlere Geschwindigkeiten betrachtet¹³⁴)*

¹³⁴ Eine Spezifizierung der Geschwindigkeiten erfolgt in Kapitel 4.6.3 der Schadensschwere.

-
- *Beim Verlassen des Egofahrzeugs am rechten Fahrstreifenrand mit angrenzendem Fußweg/Radweg kommt es zu einer Kollision mit Radfahrern oder ähnlichen Verkehrsteilnehmern (VT) wie E-Scooter-fahrern, da zwischen aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs und den dort fahrenden VT die Wahrnehmung nicht rechtzeitig erfolgt.*

Weitere Szenarien innerhalb dieser Kategorie ergeben sich bspw. durch das *Verlassen des Egofahrzeugs in verkehrsberuhigten Bereichen, auf Parkplätzen/Parkstreifen, im Stop-and-Go-Verkehr, in engen einstreifigen Straßen etc.* und werden in der Tabelle im Anhang 4 aufgezählt.

Dieses Vorgehen lässt sich beliebig auf die anderen Kategorien anwenden. Ein weiteres wichtiges gefährliches Szenario liefert die Kombination des Hauptkriteriums *Sichtbarkeit des Egofahrzeugs* mit dem Straßenlayout-Kriterium *vorhandene Kurve*. Das sich daraus ergebende gefährliche Szenario lautet daher:

- *Durch eingeschränkte Sichtbarkeit des Egofahrzeugs in Kurvenbereichen kommt es zu einer Kollision, da dieses für nachfolgende Verkehrsteilnehmer zu spät sichtbar wird, um ein rechtzeitiges Anhaltemanöver zur Kollisionsvermeidung durchzuführen.*

Eigens für dieses Szenario wurde ein Sichtweitenmodell entwickelt, welches die Kontrollierbarkeit in Kurven in Abhängigkeit verschiedener Parameter darstellt. Dieses Modell wird in Kapitel 4.6.1 ausführlich erklärt.

Nachfolgend wird abschließend zu gefährlichen Szenarien noch beispielhaft die Kategorie *Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug* betrachtet. In Kombination mit den Straßenlayout-Kriterien *vorhandene Kreuzung, vorhandene Einmündung, vorhandener Radweg* oder *vorhandener Fußgängerüberweg* ergeben sich folgende Szenarien:

- *Eine Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug durch Stehenbleiben im Kreuzungs-/ Einmündungsbereich (Anwendung des § 12 Abs. 3 Nr. 1 StVO¹³⁵), d.h. in einem Abstand von 5 Metern vor und hinter den Schnittpunkten der Fahrbahnkanten, führt zu einer Kollision, da andere Verkehrsteilnehmer beim Überqueren der Kreuzung oder Einfädeln in den Querverkehr diesen zu spät wahrnehmen.*
- *Eine Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug durch Stehenbleiben vor Radwegen im Kreuzungsbereich führt zu einer Kollision mit Radfahrern, welche die Kreuzung überqueren, da diese zu spät von abbiegenden Verkehrsteilnehmern erkannt werden.*
- *Eine Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug durch Stehenbleiben vor/auf Fußgängerüberwegen (im Kreuzungsbereich), führt zu einer Kollision mit Fußgängern, da diese beim Überqueren zu spät von anderen Verkehrsteilnehmern erkannt werden.*

¹³⁵ BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) (2013).

Die beispielhafte Entwicklung gefährlicher Szenarien innerhalb der letzten Kategorie (*Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug*) erfolgt nachfolgend anhand potenzieller Missionsgefährdungen, da diese Kategorie dort ebenfalls betrachtet wird und die Kombinationsmöglichkeiten in etwa auf den gleichen Kriterien beruhen.

Mögliche Beispiele zur Herleitung potenzieller Missionsgefährdungen

Das Hauptkriterium *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug* wird sowohl als Kategorie innerhalb der gefährlichen Szenarien verwendet, als auch als einzige Kategorie innerhalb der Missionsgefährdungen.

Durch Kombination mit den Straßenlayout-Kriterien *vorhandene Grundstücksausfahrten, vorhandene Einbahnstraßen, vorhandene harte laterale Begrenzungen* und *vorhandene Ladezonen* ergeben sich beispielhaft folgende Missionsgefährdungen:

- *Eine Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug durch Stehenbleiben unmittelbar vor Grundstückseinfahrten /-ausfahrten bzw. gegenüber von Ausfahrten, wenn der zur Verfügung stehende Straßenraum nicht zum Aus- oder Einfahren ausreichen würde, führt zu einer Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern.*
- *Eine Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug durch Stehenbleiben in engen Einbahnstraßen mit harten lateralen Begrenzungen führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern.*
- *Eine Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug durch Stehenbleiben in Ladebuchten/Ladezonen führt zu einer Gefährdung der Fahrmissionen des Lieferverkehrs.*

Zusammenfassend zeigt dieses Vorgehen der Kombination von verschiedenen identifizierten Kriterien, dass vielfältige Möglichkeiten bestehen, gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen herzuleiten. Die vollständige Ausarbeitung wird in den Tabellen (Anhang 4 und 5) der durchgeführten HARA, im 2. Kapitel des Anhangs, dargestellt.

4.6 Dimensionen und Spezifizierungen des Risikos zur Durchführung der HARA

Zur Festlegung eines Risikolevels besteht die Notwendigkeit, die identifizierten gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen aus Kapitel 4.5 hinsichtlich der drei in der ISO 26262-3¹³⁶ beschriebenen Risikodimensionen *Kontrollierbarkeit, Auftretenswahrscheinlichkeit* und *Schadensschwere* zu bewerten. Diese Bewertung ist nur anhand Erläuterungen und Spezifizierungen der Dimensionen möglich, sodass dies in den nachfolgenden Unterkapiteln erfolgt.

Die in Kapitel 4.6.1 erläuterte Kontrollierbarkeit stellt insbesondere im Hinblick auf die Sichtbarkeit des Egofahrzeugs in Kurven einen wichtigen Aspekt dar und bedarf daher einer genaueren Betrachtung sowie der Entwicklung eines Sichtweitenmodells. Dieses Modell und weitere Erläuterungen,

¹³⁶ ISO: ISO 26262-3:2018 (2018), S. 7 ff.

beispielsweise im Zusammenhang von Wahrscheinlichkeiten oder der Schadensschwere, werden daher anhand eigener Überlegungen und in Kombination mit bereits vorhandenen Erklärungen der ISO 26262 nachfolgend dargestellt.

4.6.1 Definition und Spezifizierung der Kontrollierbarkeit

Die erste Risikodimension der HARA stellt die Kontrollierbarkeit durch beteiligte Personen, bei Eintritt eines gefährlichen Szenarios oder einer Missionsgefährdung, dar. Im Zusammenhang dieser Arbeit werden fahrerlose Fahrzeuge betrachtet, sodass sich die Kontrollierbarkeit auf Personen bezieht, welche die Fähigkeiten zur Abwendung eines Schadens bzw. einer Gefährdung besitzen. Beteiligte Personen sind daher andere Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, Fahrer anderer Kraftfahrzeuge etc.) oder Insassen des Egofahrzeugs, welche durch den Haltevorgang des Egofahrzeugs unmittelbar betroffen sind und Einfluss auf den Eintritt bzw. das Ausmaß eines gefährlichen Szenarios bzw. eine Missionsgefährdung haben.

Hinsichtlich gefährlicher Szenarien bezieht sich die Kontrollierbarkeit auf die mögliche Abwendung von Personenschäden, hervorgerufen durch Kollisionen oder Behinderungen von Rettungsfahrzeugen, d.h. es wird betrachtet, in welchem Maß andere Verkehrsteilnehmer in der Lage sind, eine Kollision zu vermeiden oder eine Rettungsmission dennoch auszuführen. Eine mögliche Kollision entsteht z.B., wenn das Egofahrzeug in bestimmten Bereichen einer scharfen Kurve steht und dadurch nachfolgende Verkehrsteilnehmer nicht mehr in der Lage sind, eine rechtzeitige Bremsung ab dem Zeitpunkt des Sichtbarwerdens auszuführen. Diesbezüglich ist die Entwicklung eines Sichtweitenmodells erforderlich, welches später in diesem Kapitel erläutert wird.

Bei Missionsgefährdungen im Allgemeinen, d.h. ohne Personenschäden, wird hingegen betrachtet, ob bzw. unter Zuhilfenahme welcher Aktionen andere Verkehrsteilnehmer in der Lage sind, ihre Missionsziele zu erreichen. Beispielsweise kann eine Fahrmission nicht erreicht werden, wenn Grundstücksausfahrten blockiert werden oder nur erschwert erreicht werden, wenn die Blockade einer Straße das Umfahren durch Nutzung anderer Verkehrswege erfordert.

Die Kategorisierung der Kontrollierbarkeit erfolgt für beide genannten Bereiche der HARA wie in nachfolgend in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Kategorisierung der Kontrollierbarkeit

Kontrollierbarkeit bzgl. gefährlicher Szenarien/Missionsgefährdungen			
K0	K1	K2	K3
im Allgemeinen kontrollierbar	leicht kontrollierbar	normal kontrollierbar	schwer/nicht kontrollierbar

Die in der Tabelle dargestellten Bezeichnungen der einzelnen Kategorien sind nur bedingt aussagekräftig hinsichtlich der tatsächlichen Einordnung von gefährlichen Szenarien bzw. Missionsgefährdungen. Die ISO 26262-3 bietet daher in Tabelle B.6¹³⁷ eine Übersicht möglicher gefährlicher Ereignisse. Diese beziehen sich jedoch auf die funktionale Sicherheit und sind somit nicht ohne Weiteres

¹³⁷ ISO: ISO 26262-3:2018 (2018), S. 26.

auf die Halteort-Problematik anwendbar. Jedoch werden die einzelnen Kategorien näher spezifiziert, indem die Kontrollierbarkeit auf den Anteil der Personen bezogen wird, welche durchschnittlich in der Lage sind, einen Schaden abzuwenden. Diese Anteile werden im Sinne von gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen ebenfalls angewendet. Die entsprechenden Anteile der Personen betragen nach ISO 26262-3¹³⁸ bei

- K0-Einstufung im Allgemeinen 100 %, da eine Kontrollierbarkeit allgemein erwartet werden kann,
- bei K1 mehr als 99 %,
- bei K2 zwischen 90 % und 99 % und
- bei K3 weniger als 90 %.

Die Anteile beruhen dabei auf der Annahme, dass ein Fahrer, im Kontext dieser Arbeit also ein anderer Verkehrsteilnehmer,

- fahrtüchtig ist (nicht müde, alkoholisiert, etc.),
- geschult ist (Besitz eines Führerscheins),
- sich an die bestehenden gesetzlichen Regeln hält und
- Risikoprävention betreibt.

Vorhersehbares Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer wird bei der Kontrollierbarkeit im angemessenen Rahmen berücksichtigt, z.B. zu dichtes Auffahren. Auch die Fähigkeit von Personen, gefährliche Situationen von sich selbst oder anderen abzuwenden, fällt unter diese Risikodimension.

Die genannten Anteile für Personen, die durchschnittlich in der Lage sind einen Schaden abzuwenden, werden wie erwähnt auch auf Missionsgefährdungen übertragen. D.h. die Anteile beziehen sich in diesem Fall auf Personen, die fähig sind, eine Missionsgefährdung abzuwenden, um ihre Missionsziele unter minimalen Zeitverlusten bzw. Umwegen zu erreichen. Wird beispielsweise eine Straße durch das Egofahrzeug blockiert, so können weniger als 90% der Verkehrsteilnehmer die Missionsgefährdung abwenden (K3), da ein Umfahren nur unter Zeitverlusten und Umwegen möglich ist. Steht hingegen das Egofahrzeug am rechten Fahrbahnrand und ist durch Nutzung weiterer Fahrstreifen in Fahrtrichtung ein Passieren des Egofahrzeugs möglich, so können in der Regel mehr als 99% das Egofahrzeug mit sehr geringen Zeitverlusten passieren und ihr Missionsziel erreichen (K1).

Im Zusammenhang mit den Erläuterungen bieten diese Personenanteile daher im Allgemeinen einen Anhaltspunkt, geeignete Rationale zu formulieren, um dadurch die Kategorisierung der Kontrollierbarkeit gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen zu begründen.

Speziell im Fokus der Kontrollierbarkeit steht, wie bereits bei den Beispielen zur Herleitung potenziell gefährlicher Szenarien angedeutet, die eingeschränkte Sichtbarkeit des Egofahrzeugs in Kurvenbereichen und die damit einhergehende Kollisionsgefahr. Diese besteht, da nachfolgende Verkehrsteilnehmer bei der Durchfahrt einer Kurve nicht rechtzeitig in der Lage sind, das stehende Egofahrzeug zu erkennen, um eine Gefahrenbremsung einzuleiten und eine Kollision zu vermeiden. Daher

¹³⁸ ISO: ISO 26262-3:2018 (2018), S. 26.

wird nachfolgend ein Sichtweitenmodell erläutert, das dazu dient, in Abhängigkeit verschiedener Parameter eine Kategorisierung hinsichtlich der Kontrollierbarkeit zu begründen.

Sichtweitenmodell zur Kategorisierung der Kontrollierbarkeit in Kurven

Um im Allgemeinen eine Kollision innerhalb von Kurven zu vermeiden, muss der *vorhandene Anhalteweg* (s_{vor}) zu jedem Zeitpunkt größer sein als der *erforderliche Anhalteweg* (s_{erf}). Daraus ergibt sich folgende Bedingung:

$$s_{\text{vor}} > s_{\text{erf}} \quad (4-1)$$

Es wird die Annahme getroffen, dass der Anhalteweg in Kurven und auf Geraden gleich lang ist. Zudem werden Steigungen und Gefälle bei der Berechnung des Anhaltewegs vernachlässigt.

Erforderlicher Anhalteweg

Die beeinflussenden Parameter des *erforderlichen Anhaltewegs* sind neben der Reaktionszeit (t_R), die Ausgangsgeschwindigkeit (v_0), der Reibbeiwert (μ) und die Erdbeschleunigung (g), sodass sich nachfolgende Formel ergibt für den *erforderlichen Anhalteweg* ergibt, welcher sich aus Reaktionsweg (s_R) und Bremsweg (s_B) zusammensetzt:

$$s_{\text{erf}} = s_R + s_B = \frac{v_0}{3,6} \cdot t_R + \frac{\left(\frac{v_0}{3,6}\right)^2}{2\mu g} \quad (4-2)$$

Der Bremsweg wird vereinfacht aus dem Energieerhaltungssatz berechnet, indem die kinetische Energie gleichgesetzt wird mit der Reibungskraft multipliziert mit dem zurückgelegten Bremsweg:

$$E_{\text{kin}} = F_{\text{Reib}} \cdot s_B \Leftrightarrow \frac{1}{2}mv^2 = \mu mg s_B \Leftrightarrow s_B = \frac{v^2}{2\mu g} \quad (4-3)$$

Der Faktor 3,6 in Formel (4-2) stammt aus der Umrechnung von km/h in m/s.

Im Kontext von Sichtbereichen in Kurven erfolgt auf Grund der Kontrollierbarkeitskategorisierung K0 bis K3 eine Abgrenzung durch die Reaktionszeit. Je größer diese gewählt wird, desto mehr Zeit verbleibt im realen Verkehr den nachfolgenden Fahrzeugen, um innerhalb einer Kurvendurchfahrt auf ein Hindernis zu reagieren und die Situation zu kontrollieren. Eine größere Reaktionszeit hat eine bessere Kontrollierbarkeit zur Folge und geht daher mit einer niedrigeren K-Einstufung einher.

Häufig wird der Reaktionsweg mit der sogenannten Schrecksekunde als Reaktionszeit (auch: Reaktionsdauer) berechnet, obwohl es nicht ausschließlich auf die Reaktionsdauer ankommt. Stattdessen müssen bis zur Erbringung der vollständigen Bremswirkung

- die Reaktionsdauer (Zeitspanne zwischen der Wahrnehmung eines Hindernisses, Entscheidung des Fahrers, Umsetzung des Fußes vom Gas- aufs Bremspedal und Überwindung des Spiels am Bremspedal),
- die Bremsansprechdauer (abhängig von Eigenschaften den Bremsanlage) und
- die Bremsanschwelldauer (Dauer zum Erreichen der vollen Bremswirkung)

berücksichtigt werden, sodass die Aggregation dieser Größen die gesamte Reaktionszeit bei Betrachtung des Sichtweitenmodells darstellen.^{139a}

Je nach körperlicher Verfassung, geistiger Disposition und Konzentration sind laut Literatur 0,5 bis 2 Sekunden für die reine Reaktionsdauer realistisch und für die Bremsansprech- und Bremsanschwelldauer insgesamt 0,2 Sekunden^{139b}. Um daraus eine Kategorisierung für die Kontrollierbarkeit abzuleiten, werden konservativ 1,0/1,5/2 Sekunden für die Reaktionsdauer und 0,2 Sekunden für Bremsansprech- und Bremsanschwelldauer angesetzt, sodass sich 1,2/1,7/2,2 Sekunden für die gesamte Reaktionszeit zur Erfüllung der oben genannten Bedingung (4-1) für die Kontrollierbarkeitsstufen K3/K2/K1 ergeben. Die Kategorie K0 hingegen wird einem Kurvenbereich nur zugeordnet, wenn keine Sichtbehinderung besteht und ist daher unabhängig von der Reaktionszeit.

Die zweite Variable innerhalb des *erforderlichen Anhaltewegs* ist die Ausgangsgeschwindigkeit. Bezüglich der Geschwindigkeit im Straßenverkehr gilt grundsätzlich das Sichtfahrgebot gemäß §3 Nr.1 StVO¹⁴⁰, welches eine Anpassung an die Sichtweite erfordert. Im Kontext der Halteort-Problematik werden jedoch auch Worst Case-Szenarien betrachtet. Daher ist ein Sichtweitenmodell erforderlich, welches in Kurvenbereichen auch Geschwindigkeiten berücksichtigt, welche nicht dem Sichtfahrgebot entsprechen. Es wird daher eine konservative Ausgangsgeschwindigkeit zur Berechnung des erforderlichen Anhaltewegs in Kurvenbereichen herangezogen. Als Maßstab dient die jeweils vorgegebene Geschwindigkeit einer Geschwindigkeitszone, zu welcher ein Wert von 10 Stundenkilometer als Sicherheitspuffer addiert wird.

Die dritte beeinflussende Größe des Anhaltewegs ist der Reibbeiwert, welcher beispielsweise abhängig ist vom jeweiligen Straßenbelag oder von der Feuchtigkeit bzw. Trockenheit der Fahrbahnoberfläche. Zur Berechnung des *erforderlichen Anhaltewegs* besteht daher die Möglichkeit, verschiedene Reibbeiwerte heranzuziehen. Eine Betrachtung trockener und nasser Straßen erscheint ausreichend, da die fahrerlosen Projektfahrzeuge nicht bei Straßenglätte eingesetzt werden und eine Aussage über spezifische Straßenbeläge generell schwierig ist. Daher werden die Werte 0,7 bzw. 1,1 für den Reibbeiwert bei Nässe bzw. Trockenheit gemäß Literatur¹⁴¹ für diese Arbeit gewählt.

Die Erdbeschleunigung innerhalb der Formel zur Berechnung des Anhaltewegs ist nahezu konstant und beträgt $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Damit sind alle relevanten Größen hinsichtlich des *erforderlichen Anhaltewegs* für Bedingung (4-1) erklärt.

Vorhandener Anhalteweg gemäß des Sichtweitenmodells (siehe auch Anhang 6 bis Anhang 9)

Die Betrachtung des *vorhandenen Anhaltewegs* erfordert hingegen die Entwicklung eines Sichtweitenmodells. In dieser Arbeit beschränkt sich die Modellanwendung auf den kurveninneren Fahrstreifen.

¹³⁹ Wolff, C.: Grundlagen zum Bremsvorgang (2017). a: S. 19; b: S. 20.

¹⁴⁰ BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) (2013).

¹⁴¹ Eichhorn, U. et al.: Fahrzeugtechnische Anforderungen (2017), S. 33.

fen von Rechtskurven, da dort bspw. auf Grund von Gebäuden, anderen Bebauungen oder Begrünungen die Möglichkeit einer Sichteinschränkung besteht. Eine Übertragung des Modells auf Linkskurven von Richtungsfahrbahnen bspw. Einbahnstraßen ist ebenso möglich. Keine Anwendung hingegen findet das Modell auf nicht kurveninnere Fahrstreifen, da die Annahme getroffen wird, dass dort auf Grund der Entfernung zu einem Sichthindernis keine Sichteinschränkung besteht.

Die notwendigen Modellparameter, welche die Sichtweite und somit den *vorhandenen Anhalteweg* beeinflussen werden nachfolgend definiert. Dazu gehören

- der gegebene Kurvenradius R zur Fahrstreifenmitte und der gegebene Kurvenwinkel κ ,
- der zurückgelegte Weg des Egofahrzeugs seit Kurvenbeginn l ,
- der gegebene Abstand a vom Fahrstreifenrand zu einem möglichen Sichthindernis und
- der Abstand b vom Augpunkt A des Fahrers eines nachfolgenden Fahrzeugs zum Fahrstreifenrand bzw. vom Zielpunkt B (äußerster Punkt in Richtung Fahrstreifenmitte des Egofahrzeugs) zum Fahrstreifenrand.

Nachfolgend werden in Abbildung 4-1 die aufgeführten Größen zum besseren Verständnis dargestellt.

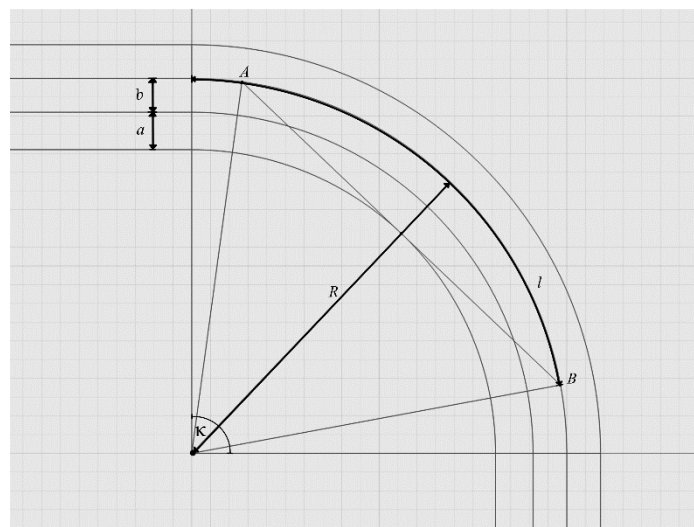


Abbildung 4-1: Einflussgrößen des vorhandenen Anhaltewegs im Sichtweitenmodell

Hinsichtlich des Abstandes b wird angenommen, dass der Augpunkt des Fahrers eines möglichen nachfolgenden Fahrzeugs sich in etwa auf halber Fahrstreifenbreite befindet. Ebenfalls befindet sich die Außenkante des Egofahrzeugs, welche bei Durchfahrt einer Kurve zuerst sichtbar wird, annahmemäßig auf halber Fahrstreifenbreite, da das Egofahrzeug am rechten Fahrbahnrand anhält. Zudem werden die Annahmen getroffen, dass Sichteinschränkungen unabhängig von Steigungen und Gefällen sind und vollständig die Sicht verdecken. Hinsichtlich des Sichtbarwerdens des Egofahrzeugs wird angenommen, dass eine Anhaltemanöver eingeleitet werden kann, sobald der Sichtstrahl zwischen Aug- und Zielpunkt nicht mehr durch ein Hindernis unterbrochen wird.

Diese Annahme widerspricht der Tatsache, dass die Wahrnehmung des menschlichen Auges begrenzt ist und Hindernisse eine Mindestgröße aufweisen müssen, um wahrgenommen und erkannt zu werden. Physiologisch ist die Annahme daher unbefriedigend, geometrisch jedoch sinnvoll, da es schwer möglich ist, für die Bemessung der Sichtbarkeit bestimmte Abmessungen und optische Eigenschaften eines Hindernisses festzulegen.¹⁴²

Mögliche Fälle im Sichtweitenmodell

Zur Berechnung des *vorhandenen Anhaltewegs* ist die Betrachtung dreier bzw. vierer Fälle notwendig, da sich die geometrischen Beziehungen je nach Fall verändern. Für die Fälle 1-3 werden daher unterschiedliche Formelzusammenhänge für s_{vor} entwickelt.

Fall 0 wird dadurch definiert, dass das Egofahrzeug nur soweit in die Kurve einfährt, sodass keine Sichtbehinderung besteht, d.h. der Sichtstrahl zwischen Aug- und Zielpunkt zwischen Folge- und Egofahrzeug wird nicht unterbrochen. Durch Begründung mit geometrischen Beziehungen lässt sich dazu folgende Bedingung herleiten, für die keine Sichtstrahlunterbrechung besteht:

$$l < \frac{2\pi R\alpha}{360} \quad (4-4)$$

In *Fall 1* befindet sich das Folgefahzeug (dargestellt durch den kleinen Quader auf der rechten Bildseite in Abbildung 4-2) außerhalb der Kurve, d.h. $x_1 > 0$ und das Egofahrzeug (dargestellt durch den großen Quader mittig des Bildes) innerhalb der Kurve. Dies wird nachfolgend durch Abbildung 4-2 dargestellt.

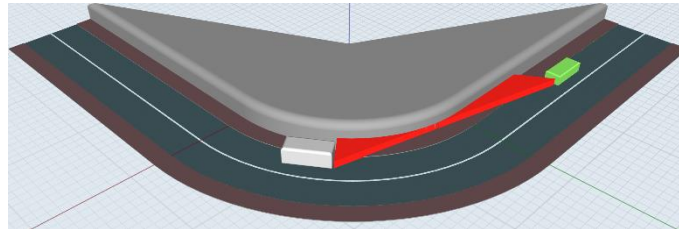


Abbildung 4-2: *Fall 1* des Sichtweitenmodells

Durch Begründung mittels der Skizze in Anhang 7 ist in *Fall 1* eine Sichteinschränkung möglich, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$\frac{2\pi R\alpha}{360} \leq l < \frac{4\pi R\alpha}{360} \text{ und } l < l_{\text{ges}} \text{ und } x_1 > 0 \quad (4-5)$$

¹⁴² FGSV: Linienführung RAS-L (1995).

In *Fall 2* befinden sich Aug- und Zielpunkt innerhalb der Kurve, also zwischen Beginn und Ende der Kurvenkrümmung, was durch Abbildung 4-3 deutlich wird.

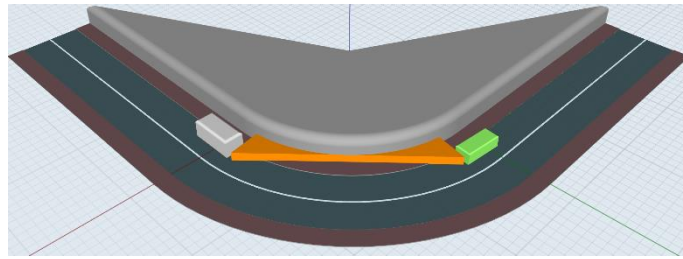


Abbildung 4-3: *Fall 2* des Sichtweitenmodells

Als Bedingung für eine mögliche Sichteinschränkung ergibt sich gemäß Anhang 8:

$$\frac{4\pi R\alpha}{360} \leq l < l_{\text{ges}} \quad (4-6)$$

Die gesamte Kurvenlänge l_{ges} muss den berechneten Wert gemäß der Bedingung (4-6) überschreiten, da sonst auf Grund einer zu kurzen Kurve keine Sichtbehinderung durch das Sichthindernis besteht, wenn sich beide Fahrzeuge innerhalb der Kurve befinden.

Zuletzt befindet sich in *Fall 3* nur noch das Folgefahrzeug innerhalb der Kurve und das Egofahrzeug außerhalb ($l \geq l_{\text{ges}}$). Dies wird nachfolgend durch Abbildung 4-4 veranschaulicht.

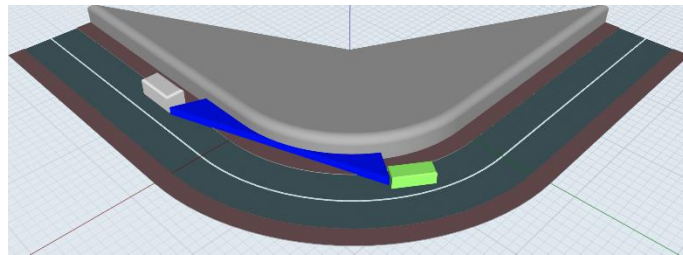


Abbildung 4-4: *Fall 3* des Sichtweitenmodells

Die Bedingung für eine mögliche Sichtbehinderung in *Fall 3* lautet gemäß Anhang 9:

$$l \geq l_{\text{ges}} > \frac{2\pi R\alpha}{360} \rightarrow x_2 > 0 \quad (4-7)$$

Eine Sichteinschränkung durch eine Kurve tritt immer auf, wenn sich das Egofahrzeug außerhalb der Kurve befindet und das Folgefahrzeug die Kurve mit der in Bedingung (4-7) genannten Mindestlänge durchfährt. Die endgültigen mathematischen Beziehungen der *vorhandenen Anhaltewege* werden auf Grund des Umfangs in diesem Kapitel nicht detailliert aufgeführt. Stattdessen wird zur genauen Erklärung auf die Herleitung mittels entwickelter Skizzen und geometrischer Beziehungen auf Anhang 6 bis Anhang 9 verwiesen. Nachfolgend wird jedoch ein Rechenbeispiel erläutert, das dazu dient, einer Kurve die aufgeführten Kontrollierbarkeitsbereiche zuzuordnen.

Beispiel:

Betrachtet wird eine fiktive Kurve mit Bebauung im Kurveninneren, Radius $R = 15$ m, Abstand vom Fahrstreifenrand zum Sichthindernis $a = 0,5$ m, Abstand vom Aug-/Zielpunkt zum Fahrstreifenrand $b = 1,8$ m (halbe Fahrstreifenbreite) und Kurvenwinkel $\kappa = 90^\circ$. Zur Berechnung des *erforderlichen Anhaltewegs* wird angenommen, dass die Fahrbahn trocken ist ($\mu = 1,1$) und sich die Kurve in einer

30 km/h-Zone befindet, sodass die Ausgangsgeschwindigkeit dementsprechend mit $v_0 = 40$ km/h festgelegt wird. Die nachfolgenden berechneten Werte wurden auf zwei Nachkommastellen genau gerundet.

Mit der Formel aus (4-2) ergeben sich durch Einsetzen der genannten Werte und der entsprechenden Reaktionszeiten $t_R = 1,2$ s/1,7 s/2,2 s die *erforderlichen Anhaltewege* $s_{\text{erf}} = 19,05$ m/24,61 m/30,16 m. Diese werden nacheinander in Bedingung (4-1) eingesetzt, um die Kontrollierbarkeiten K3/K2/K1 zu bestimmen:

- Zur Erfüllung der Kontrollierbarkeit K1 muss der *vorhandene Anhalteweg* s_{vor} größer sein als der *erforderliche Anhalteweg* $s_{\text{erf}} = 30,16$ m.
- Zur Erfüllung der Kontrollierbarkeit K2 muss der *vorhandene Anhalteweg* s_{vor} größer sein als der *erforderliche Anhalteweg* $s_{\text{erf}} = 24,61$ m.
- Zur Erfüllung der Kontrollierbarkeit K3 muss der *vorhandene Anhalteweg* s_{vor} größer sein als der *erforderliche Anhalteweg* $s_{\text{erf}} = 19,05$ m.

Nachfolgend wird die Vorgehensweise der Berechnungen für die einzelnen Fälle erläutert. Die detaillierten Formelzusammenhänge zur Berechnung sind entsprechend den einzelnen Fällen Anhang 7 bis Anhang 9 zu entnehmen.

In *Fall 0* ergibt sich eine K0-Kategorisierung, wenn das Egofahrzeug nur so weit in die Kurve einfährt, sodass es nicht durch ein Sichthindernis für ein nachfolgendes Fahrzeug verdeckt wird. Anhand der Bedingung (4-4) trifft dies für $l < 8,42$ m zu, sodass der K0-Bereich von vor der Kurve bis zu diesem berechneten Wert für l reicht.

Für *Fall 2* hat der *vorhandene Anhalteweg* gemäß der Formel dieses Falls den Wert $s_{\text{vor}} = 16,83$ m, solange die Bedingung (4-6) erfüllt wird. Da dieser Wert kleiner ist als der *erforderliche Anhalteweg* aller Kategorisierungsfälle, wird Bedingung (4-1) daher nie erfüllt, sodass eine Kategorisierung mit K3 erfolgt. Der Bereich, in dem K3 gilt, wird bestimmt, indem die Weglänge des Egofahrzeugs seit Kurvenbeginn l so gewählt wird, sodass die Bedingung (4-6) erfüllt wird. Dies trifft für $16,83 \text{ m} \leq l < 23,56$ m zu und wurde mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft® Excel® berechnet.

In *Fall 1* ist eine Art Näherung bezüglich l notwendig, um Kontrollierbarkeitsbereiche zu bestimmen, da der Formelzusammenhang des *vorhandenen Anhaltewegs* in diesem Fall sehr komplex ist und nicht ohne Weiteres nach l umgestellt werden kann. Durch Ausprobieren und Einsetzen verschiedener Werte für l in die entsprechende Formel für s_{vor} wird l so angenähert, sodass die *vorhandenen Anhaltewege* gerade den berechneten Werten der *erforderlichen Anhaltewege* der einzelnen Kontrollierbarkeitsstufen K1-K3 entsprechen. Diese Annäherung wurde innerhalb dieses Beispiels ebenfalls mit Microsoft® Excel® durchgeführt, indem die gegebenen Größen und Formelzusammenhänge einmal definiert wurden, um somit durch Variation von l schnell die *vorhandenen Anhaltewege* zu ermitteln, die den *erforderlichen Anhaltewegen* für K1-K3 entsprechen. Als Ergebnis ergeben sich die Intervalle gemäß Tabelle 4-4, welche die Kontrollierbarkeitsbereiche in *Fall 1* definieren.

Tabelle 4-4: Kontrollierbarkeitsbereiche und Intervalllänge l für *Fall 1*

K1	K2	K3
$8,42 \text{ m} \leq l < 10,07 \text{ m}$	$10,07 \text{ m} \leq l < 10,72 \text{ m}$	$10,72 \text{ m} \leq l < 16,83 \text{ m}$

In *Fall 3* werden zur Bestimmung der Kontrollierbarkeitsstufen ebenfalls die Werte für l , analog zu *Fall 1*, angenähert, da der Formelzusammenhang des *vorhandenen Anhaltewegs* ebenfalls komplex ist.

Insgesamt ergeben sich gemäß den beschriebenen Fällen dadurch die nachfolgend in Tabelle 4-5 dargestellten Intervalle der vom Egofahrzeug zurückgelegten Weglänge l seit Kurvenbeginn sowie die zugehörigen Kontrollierbarkeitsbereiche.

Tabelle 4-5: Kontrollierbarkeitsbereiche in Abhängigkeit der Intervalllänge l

Fall	Kontrollierbarkeit	Intervall l
0	K0	$l < 8,42 \text{ m}$
1	K1	$8,42 \text{ m} \leq l < 10,07 \text{ m}$
1	K2	$10,07 \text{ m} \leq l < 10,72 \text{ m}$
1	K3	$10,72 \text{ m} \leq l < 16,83 \text{ m}$
2	K3	$16,83 \text{ m} \leq l < 23,56 \text{ m}$
3	K3	$23,56 \text{ m} \leq l < 37,46 \text{ m}$
3	K2	$37,46 \text{ m} \leq l < 43,66 \text{ m}$
3	K1	$l \geq 43,66 \text{ m}$

Werden die Intervalle der Kontrollierbarkeitsbereiche in eine maßstabsgetreue Skizze der beispielhaften Kurve eingetragen, so ergeben sich die dargestellten Bereiche gemäß Abbildung 4-5 in der Reihenfolge K0 (weiß) → K1 (grün) → K2 (orange) → K3 (rot) → K2 → K1 (beginnend oben links in der Abbildung und entlang des rechten Fahrstreifenrands, bis zum unteren Rand auf der rechten Seite in der Abbildung).

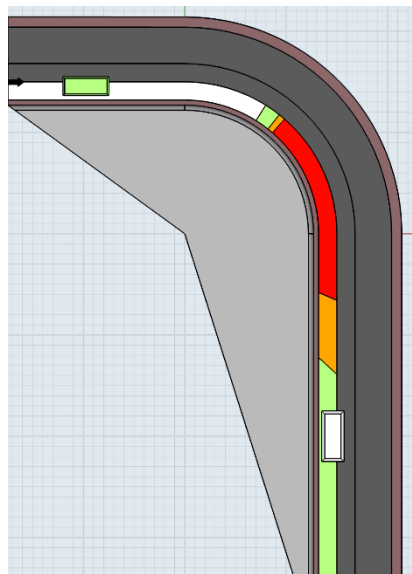


Abbildung 4-5: Skizze der Kontrollierbarkeitsbereiche anhand der beispielhaften Kurve

Der Bereich vor der Kurve und z.T. innerhalb ist im Allgemeinen kontrollierbar (K0), da dort keine Sichtbehinderung besteht. Anschließend folgt ein sehr kleiner Bereich der leichten, darauf ein noch kleinerer Bereich der normalen und ein großer Bereich der schweren Kontrollierbarkeit. Darauf nimmt die Kontrollierbarkeit wieder zu, d.h. es folgt ein kleiner Bereich der normalen Kontrollierbarkeit und schließlich ein großer leicht kontrollierbarer Bereich. Da definitionsgemäß ein Halteort im Allgemeinen nur kontrollierbar ist, wenn keine Sichtbehinderung auftritt, endet die Kontrollierbarkeitseinteilung mit K1 statt K0, da bei Durchfahrt der beispielhaften Kurve mit Sichthindernis immer eine Sichtbehinderung besteht. Die sehr kleinen Bereiche am Kurveneingang (K1 und K2) sind in diesem Beispiel kaum voneinander differenzierbar, sodass hier Diskussionsbedarf besteht, diese der anschließenden K3-Stufe zuzuordnen. Insbesondere der Bereich für K2 ist gemäß Tabelle 4-5 gerade einmal 0,65 m lang, sodass in der Realität eine Differenzierung praktisch nicht möglich ist.

Zusammenfassung hinsichtlich der Kontrollierbarkeit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Sichtweitenmodell auf verschiedene Rechtskurven sowie auf Linkskurven von Richtungsfahrbahnen anwendbar ist. Es bietet als Ergebnis verschiedener Formelzusammenhänge eine mögliche Kontrollierbarkeitsabstufung von Halteorten in Kurvenbereichen.

Diese Abstufung ist bei der HARA hinsichtlich des gefährlichen Szenarios der Kollisionsgefahr durch eingeschränkte Sichtbarkeit des Egofahrzeugs in Kurvenbereichen relevant (gefährliches Szenario Nr. 40 in Anhang 4) und liefert daher eine Rationale zur Zuordnung der Kontrollierbarkeitswerte K0 bis K3.

Die Kontrollierbarkeit lässt sich schließlich auf verschiedene Art begründen. Entweder

- anhand des Sichtweitenmodells im Zusammenhang von Kurven oder
- durch Formulierung von Rationalen, auf Grundlage der eingangs dieses Kapitels erwähnten Werte für Personenanteile und dazugehörigen Erläuterungen, die durchschnittlich in der Lage sind, einen Schaden (im Falle gefährlicher Szenarien) oder eine Missionsgefährdung abzuwenden.

Durch Kombination mit den anderen beiden Risikodimensionen der HARA, welche in den folgenden beiden Kapiteln erläutert werden, wird die Zuordnung eines Risikolevels ermöglicht.

4.6.2 Definition und Spezifizierung der Auftretenswahrscheinlichkeit

Die zweite Risikodimension der HARA bezieht sich auf die Auftretenswahrscheinlichkeit eines gefährlichen Szenarios bzw. einer Missionsgefährdung. Im Gegensatz zur Kontrollierbarkeit und Schadensschwere wird hier in Anlehnung an die ISO 26262-3^{143a} ebenfalls eine Einteilung in fünf Stufen statt vier Stufen gewählt (A0 bis A4). Die Auftretenswahrscheinlichkeit gibt an, wie wahrscheinlich der Eintritt eines gefährlichen Szenarios oder einer Missionsgefährdung ist, wenn ein bestimmter

¹⁴³ ISO: ISO 26262-3:2018 (2018). a: S. 8; b: S. 22; c: S. 23.

Halteorte gewählt wurde. Die entsprechende Kategorisierung erfolgt wie nachfolgend in Tabelle 4-6 dargestellt und reicht von A0 – unmöglich bis A4 – hohe Wahrscheinlichkeit.

Tabelle 4-6: Kategorisierung der Auftretenswahrscheinlichkeit

Auftrittswahrscheinlichkeit bzgl. gefährlicher Szenarien/Missionsgefährdungen				
A0	A1	A2	A3	A4
unmöglich	sehr geringe Wahrscheinlichkeit	geringe Wahrscheinlichkeit	mittlere Wahrscheinlichkeit	hohe Wahrscheinlichkeit

Eine Kategorisierung mit A0 ist grundsätzlich nur sinnvoll, wenn Umstände auftreten, die nicht zu erwarten sind, beispielsweise während Naturkatastrophen wie Erdbeben, Waldbränden oder Wirbelstürmen. Als Beispiel wird hier das gefährliche Szenario genannt, dass durch einen Haltevorgang eine Straße blockiert wird, welche zum Verlassen eines Waldbrandgebietes dient.

Die weiteren Kategorien A1-A4 werden gemäß ISO 26262-3^{143b} auf die Dauer einer Situation (z.B. Dauer eines Betriebsmodus) oder die Häufigkeit des Auftretens einer Situation bezogen. Im Hinblick der Halteort-Problematik werden beide Aspekte betrachtet.

Die Dauer einer Situation, bzw. übertragen auf Halteorte, die Dauer eines Haltevorgangs wird dadurch begründet, dass ein Egofahrzeug nach Ausführung des sicheren Anhaltens eine bestimmte Zeit am gewählten Halteort einnimmt, bis es bspw. von einem Teleoperator weggefahren oder von einem Abschleppwagen abtransportiert wird. Da diese Zeitspanne jedoch grundsätzlich nicht beeinflussbar bzw. unabhängig von einem Halteort ist, wird die zweite Dimension, die Häufigkeit, ebenfalls betrachtet. In Anlehnung an Tabelle B.3 der ISO 26262-3^{143c} erfolgt die Zuordnung der Häufigkeit gefährlicher Szenarien oder Missionsgefährdungen

- mit A1, wenn diese weniger als ein Mal pro Jahr auftreten,
- mit A2, wenn diese ein paar Mal pro Jahr auftreten,
- mit A3, wenn diese einmal pro Monat oder öfter auftreten und
- mit A4, wenn diese auf fast jeder Fahrt bzw. bei jedem Haltevorgang von einer Stunde auftreten.

Größtenteils wird für gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen ein Ansatz gewählt, mit welchem anhand einer Poisson-Verteilung Wahrscheinlichkeitswerte bestimmt werden, sodass anschließend die Einteilung in die genannten Kategorien erfolgt.

Dieser Ansatz wird angewendet auf gefährliche Szenarien, welche mit einer Behinderung von Rettungs- bzw. Einsatzfahrzeugen einhergehen sowie auf gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen, die abhängig sind von der Frequenz der Nutzung einer Straße, Kreuzung etc., bzw. abhängig von der Anzahl der beteiligten Personen, die innerhalb des Haltevorgangs in ein gefährliches Szenario oder eine Missionsgefährdung verwickelt werden. Nachfolgend wird die Anwendung dieses Ansatzes erläutert.

Poisson-Verteilung im Zusammenhang der Behinderung von Rettungsfahrten

Die Poisson-Verteilung ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und betrachtet die Häufigkeit eines Ereignisses innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Sie wird auch als Verteilung der seltenen Ereignisse bezeichnet. Das bedeutet, dass die Grundgesamtheit, d.h. die Menge aller untersuchten Dinge sehr groß und die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Ereignis eintritt, gleichzeitig sehr gering ist.¹⁴⁴

Im vorliegenden Fall dieser Arbeit wird die Verteilung angewendet zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Rettungsfahrzeug ein am Halteort stehendes Egofahrzeug passieren muss, um seine Rettungsmission auszuführen. Dazu wird ein Streckenabschnitt von einem Kilometer Länge und ein Zeitraum von einer Stunde betrachtet, in dem das Egofahrzeug am Halteort steht, bis es von dort weggefahren bzw. abtransportiert wird. Es wird die Annahme getroffen, dass das Vorbeifahren eines Rettungsfahrzeugs am Egofahrzeug auf diesem Streckenabschnitt und innerhalb dieses Zeitraums ein unabhängiger und nicht erschöpfender Zufallsprozess $P_\lambda(k)$ ist. Um die Verteilung der Ereignisse darzustellen, wird die Poisson-Verteilung wie nachfolgend dargestellt herangezogen:

$$P_\lambda(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (4-8)$$

In dieser Verteilung entspricht k der Anzahl vorbeifahrender Rettungsfahrzeuge in einer Stunde auf einem betrachteten Streckenabschnitt von einem Kilometer Länge und λ dem Erwartungswert für dieses Ereignis.

Zur Bestimmung von λ werden in diesem Kontext vereinfachende Annahmen getroffen, welche jedoch notwendig sind, um einen Wahrscheinlichkeitswert für die mögliche Behinderung/Blockade von Rettungsfahrzeugen durch Wahl eines Halteortes zu bestimmen.

Aus einem Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen geht hervor, dass bundesweit im öffentlichen Rettungsdienst im Zeitraum 2016/2017 rund 169 Einsätze pro 1000 Einwohnern in einem Jahr durchgeführt wurden.¹⁴⁵

Wenn diese Anzahl auf die Einwohnerzahl einer Stadt wie bspw. Darmstadt bezogen wird, so ergeben sich mit 161843 Einwohnern¹⁴⁶ im Jahr 2018 (gerundet auf zwei Nachkommastellen):

$$\frac{147}{1000} \frac{\text{Rettungsfahrten}}{\text{Einwohner} \cdot \text{Jahr}} \cdot 161843 \text{ Einwohner} = 27351,47 \frac{\text{Rettungsfahrten}}{\text{Jahr}} \text{ in Darmstadt.} \quad (4-9)$$

Umgerechnet auf die angenommene Standzeit des Egofahrzeugs von einer Stunde ergeben sich:

$$\frac{23790,92}{365 \cdot 24} \frac{\frac{\text{Rettungsfahrten}}{\text{Jahr}}}{\frac{\text{Tage} \cdot \text{Stunden}}{\text{Jahr} \cdot \text{Tag}}} = 3,12 \frac{\text{Rettungsfahrten}}{\text{Stunde}} \text{ in Darmstadt.} \quad (4-10)$$

¹⁴⁴ Hemmerich, W. A.: Poisson-Verteilung | MatheGuru (2020).

¹⁴⁵ Schmiedl, R.; Behrendt, H.: Leistungen des Rettungsdienstes 2016/17 (2019).

¹⁴⁶ Wissenschaftsstadt Darmstadt: Entwicklung der Bevölkerung in Darmstadt (2019).

Da Darmstadt ein Straßennetz von ca. 370 Kilometer aufweist¹⁴⁷ wird einem nächsten Schritt die berechnete Anzahl von Rettungsfahrten pro Stunde vereinfacht auf einen Streckenabschnitt von einem Kilometer Länge bezogen:

$$\frac{2,72 \text{ Rettungsfahrten}}{370 \text{ Stunde} \cdot \text{Kilometer}} = 0,0084 \frac{\text{Rettungsfahrten}}{\text{Stunde} \cdot \text{Kilometer}} \text{ in Darmstadt} \quad (4-11)$$

Der Erwartungswert lautet daher:

$$\lambda = 0,0084 \frac{\text{Rettungsfahrten}}{\text{Stunde} \cdot \text{Kilometer}} \text{ bzw. entdimensionalisiert: } \lambda' = 0,0084 \quad (4-12)$$

Anschließend werden $\lambda' = 0,0084$ und $k = 1$ in die Verteilungsfunktion eingesetzt, um die Wahrscheinlichkeit zu erhalten, dass ein Rettungsfahrzeug das Egofahrzeug innerhalb einer Stunde auf einem betrachteten Streckenabschnitt in Darmstadt der Länge eines Kilometers passiert:

$$P_{0,0073}(1) = 0,0084 \cdot e^{-0,0084} \approx 0,84 \% \quad (4-13)$$

Da dieser Wert nahe 0% liegt, ist es zwar nicht unmöglich, dass ein Rettungsfahrzeug durch Halten eines fahrerlosen Fahrzeugs behindert wird, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, sodass die Kategorisierung der Auftretenswahrscheinlichkeit hinsichtlich dieser betrachteten gefährlichen Szenarien mit *A1 – sehr geringe Wahrscheinlichkeit* erfolgt.

Poisson-Verteilung im Zusammenhang von gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen im Allgemeinen

Die Auftretenswahrscheinlichkeit bezieht sich, neben der Betrachtung der Behinderungen von Rettungsfahrten, auch auf die Anzahl der beteiligten Personen, die in ein gefährliches Szenario oder eine Missionsgefährdung, durch Wahl eines Halteortes, verwickelt werden.

Steht bspw. ein Egofahrzeug auf einer Wohnstraße und werden dadurch Anwohner behindert, besteht eine potenzielle Missionsgefährdung. Es wird daher die vereinfachte Annahme getroffen, dass die Auslegung bestimmter Straßen auf eine maximale Kfz-Anzahl¹⁴⁸ innerhalb eines Zeitraums das Worst Case-Szenario bzw. das Szenario mit der höchsten Anzahl an möglichen Behinderungen darstellt.

Zur Bestimmung möglicher Wahrscheinlichkeiten für gefährliche Szenarien oder Missionsgefährdungen im Zusammenhang der Verkehrsstärke wird daher analog zu vorher die Poisson-Verteilung herangezogen. Anhand der Auslegungsanzahlen bestimmter Straßen für eine Maximalauslastung von Kraftfahrzeugen gemäß Tabelle 4-7 werden Erwartungswerte für den Worst Case bestimmt. Anhand dieser Erwartungswerte wird dann die Wahrscheinlichkeit dafür bestimmt, dass eine bestimmte Anzahl an Kfz innerhalb einer bestimmten Zeitspanne das Egofahrzeug passieren möchten bzw. durch dieses behindert werden.

¹⁴⁷ Engels, P.: Darmstadt Stadtlexikon - Straßennetz (2020).

¹⁴⁸ FGSV: RASt (2006), S. 36 ff.

Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass im Worst Case mindestens ein Fahrzeug das Egofahrzeug pro Minute passieren möchte, wird über die Poisson-Verteilung zuerst die Gegenwahrscheinlichkeit berechnet, dass kein Fahrzeug das Egofahrzeug in diesem Zeitraum passieren möchte und dann daraus die gesuchte Wahrscheinlichkeit bestimmt:

$$P_{\lambda}(k \geq 1) = 1 - P_{\lambda}(k = 0) = 1 - e^{-\lambda} \quad (4-14)$$

Durch Einsetzen der verschiedenen Erwartungswerte λ , also der maximal erwarteten Kfz/min bezüglich eines bestimmten Straßenquerschnitts in Formel (4-14) folgen gemäß der rechten Spalte in Tabelle 4-7 die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten. Diese beziehen sich also auf den Worst Case, dass mindestens ein Kfz/min das Egofahrzeug auf einer bestimmten Straßenart bzw. einem Straßenquerschnitt passieren möchte, sodass bei Wahl eines Halteortes die Gefahr besteht, dass andere Personen bzw. Verkehrsteilnehmer dadurch in gefährliche Szenarien bzw. Missionsgefährdungen verwickelt werden.

Tabelle 4-7: Auftretenswahrscheinlichkeiten nach Straßenquerschnitt

Querschnitte ¹⁴⁹	max. ausgelegte Verkehrsstärke ¹⁴⁹ [Kfz/h]	max. ausgelegte Verkehrsstärke [Kfz/min] = Erwartungswert λ	$P_{\lambda}(k \geq 1)$, gerundet auf zwei Nachkommastellen	Kategorisierung der Auftretenswahrscheinlichkeit
Wohnweg	150	2,5	91,79%	A4
Wohnstraße	400	6,67	99,87 %	A4
Sammelstraße	800	13,33	100%	A4
Quartierstraße	1000	16,67	100%	A4
dörfliche Hauptstraße	1000	16,67	100%	A4
örtliche Einfahrtsstraße	1800	30	100%	A4
örtliche Geschäftsstraße	2600	43,33	100%	A4
Hauptgeschäftsstraße	2600	43,33	100%	A4
Gewerbestraße	1800	30	100%	A4
Industriestraße	2600	43,33	100%	A4
Verbindungsstraße	2600	43,33	100%	A4
anbaufreie Straße	2600	43,33	100%	A4
Einmündungen/Kreuzungen mit Rechts-vor-links-Regelung	800	13,33	100%	A4
kleine Kreisverkehre	1500	25	100%	A4
Minikreisverkehre	1200	20	100%	A4
zweistreifige Fahrbahnen	2200	36,67	100%	A4
vierstreifige Fahrbahnen	2600 pro Richtung	43,33	100%	A4

Steht beispielsweise das Egofahrzeug auf einer Sammelstraße mit $\lambda = 13,33$ Kfz/min und müssen andere Verkehrsteilnehmer dadurch in den Gegenverkehr ausweichen, um das Egofahrzeug zu passieren, so beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein solch gefährliches Szenario innerhalb von einer Minute auftritt gemäß Tabelle 4-7 nahezu 100%. Die Zuordnung der Auftretenswahrscheinlichkeit erfolgt daher mit A4 – *hohe Wahrscheinlichkeit*.

¹⁴⁹ FGSV: RASt (2006), S. 36 ff.

Weitere Missionsgefährdungen und Szenarien, die sich nicht auf die oben genannten Querschnitte beziehen, werden mit einer geeigneten Begründung gemäß der Häufigkeit des Auftretens kategorisiert. Häufig erfolgt ebenfalls eine A4-Einstufung, da bei einem Haltevorgang von ca. einer Stunde in der Regel bestimmte Szenarien oder mögliche Gefährdungen mindestens einmal auftreten.

Eine Ausnahme stellt beispielsweise die Missionsgefährdung dar, welche Kanal- bzw. Schachtarbeiten betrifft. Diese werden in der Regel nicht täglich an der gleichen Stelle ausgeführt, sondern unter konservativer Schätzung allenfalls monatlich, sodass hier eine Kategorisierung mit A3 erfolgt.

Zusammenfassung hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeit

Zusammenfassend zeigt dieses Kapitel, dass die Auftretenswahrscheinlichkeiten gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen abhängig sind von der Haltedauer eines Egofahrzeug einerseits und der Auftretenshäufigkeit der Szenarien und Gefährdungen andererseits. Die Haltedauer ist in der Regel unabhängig vom Halteort und wird in dieser Arbeit mit einer Stunde angesetzt. Mögliche Wahrscheinlichkeiten werden im Sinne der Behinderung von Rettungsfahrten oder der Behinderung anderer Verkehrsteilnehmer auf bestimmten Straßenquerschnitten mit der Poisson-Verteilung angenähert. Ist diese Näherung nicht möglich, da es sich entweder nicht um Rettungsfahrzeuge handelt oder da Szenarien oder Missionsgefährdungen betrachtet werden, welche nicht durch die Straßenquerschnitte in Tabelle 4-7 abgedeckt werden, erfolgt eine konservative Kategorisierung anhand einer geeigneten Begründung und in Anlehnung an die eingangs dieses Kapitels erwähnten Häufigkeiten für A1 bis A4 (*weniger als ein Mal pro Jahr bis auf jeder Fahrt/bei jedem Halten von einer Stunde*).

4.6.3 Definition und Spezifizierung der Schadensschwere

Die dritte Risikodimension der HARA bezieht sich auf die Schadensschwere gefährlicher Szenarien bzw. Missionsgefährdungen. Hinsichtlich gefährlicher Szenarien werden potenzielle Personenschäden und hinsichtlich Missionsgefährdungen die Schwere potenzieller Gefährdungen bzw. (Verkehrs-)Behinderungen betrachtet, sodass eine differenzierte Kategorisierung für diese beiden Bereiche notwendig ist.

In Anlehnung an die ISO 26262-3^{150a} erfolgt eine vierstufige Einteilung (S0 – S3). Die entsprechenden Kategorisierungen werden nachfolgend in Tabelle 4-8 dargestellt.

Tabelle 4-8: Kategorisierung der Schadensschwere

Schadensschwere gefährlicher Szenarien			
S0	S1	S2	S3
keine Verletzungen	leichte bis mittlere Verletzungen	schwere bis lebensbedrohliche Verletzungen	lebensbedrohliche bis fatale Verletzungen
Schadensschwere von Missionsgefährdungen			
S0	S1	S2	S3

¹⁵⁰ ISO: ISO 26262-3:2018 (2018). a: S. 8; b: S. 21.

Schadensschwere gefährlicher Szenarien			
S0	S1	S2	S3
keine Behinderung	leichte Behinderungen (kurze Zeitverzögerungen/Umwegen)	mittlere Behinderungen (mittlere Zeitverzögerungen/Umwegen)	schwere Behinderungen (lange Zeitverzögerungen/Umwegen), Missionen nicht durchführbar

Spezifizierung von Personenschäden hinsichtlich potenziell gefährlicher Szenarien

Personenschäden beziehen sich auf alle Personen, die durch ein potenziell gefährliches Szenario mittelbar oder unmittelbar betroffenen sind. Dies sind bspw. Fahrer anderer Kfz, Fußgänger, Zweiradfahrer, Insassen des Egofahrzeugs oder auch mittelbar betroffene Personen, die durch die Wahl eines Halteortes potenziell gefährdet werden.

Die Kategorie S0 wird innerhalb der gefährlichen Szenarien zugeordnet, wenn kein Schaden erwartet wird oder ein möglicher Schaden rein materiell ist.

Mögliche Beispiele für die Kategorien S0 – S3 beinhaltet Tabelle B.1 der ISO 26262-3^{150b}. Diese dienen auch im Sinne dieser Arbeit als Anhaltspunkte, mögliche Personenschäden bei Kollisionen zu kategorisieren. Daher werden die relevanten Aspekte nachfolgend in Tabelle 4-9 zusammengefasst und um den Aspekt der mittelbaren Personenschäden erweitert.

Tabelle 4-9: Beispiele der Schadensschwere für gefährliche Szenarien nach ISO 26262-3^{150b}

Beispiele zur Kategorisierung der Schadensschwere gefährlicher Szenarien			
S0: keine Verletzungen	S1: leichte bis mittlere Verletzungen	S2: schwere bis lebensbedrohliche Verletzungen	S3: lebensbedrohliche bis fatale Verletzungen
<ul style="list-style-type: none"> • Schäden beim Ein-/Ausparken • Abkommen von einer Straße ohne Kollision/Überschlag • Kollisionen mit Straßenbeschilderungen, Leitplanken, Zäunen, Pfosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Seitlicher Zusammenstoß mit einem schmalen, ortsgebundenen Objekt (z.B. einem Baum) und sehr geringer Geschwindigkeit • Heck-/ Frontalkollision mit einem anderen Pkw und sehr geringer Geschwindigkeit • Frontalkollision ohne Fahrgastzellendeformation (z.B. Auffahrunfall) • Kollision mit Fußgänger/Radfahrer/E-Scooter und sehr geringer Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Seitlicher Zusammenstoß mit einem schmalen ortsgebundenen Objekt (z.B. einem Baum) und geringer Geschwindigkeit • Heck-/ Frontalkollision mit einem anderen Pkw und geringer Geschwindigkeit • Kollision mit Fußgänger/Radfahrer/E-Scooter und geringer Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Seitlicher Zusammenstoß mit einem schmalen ortsgebundenen Objekt (z.B. einem Baum) und mittlerer Geschwindigkeit • Heck-/ Frontalkollision mit einem anderen Fahrzeug und mittlerer Geschwindigkeit • Frontalkollision mit Fahrgastzellendeformation (z.B. Auffahrunfall) • Kollision mit Fußgänger/Radfahrer/E-Scooter und mittlerer Geschwindigkeit • bei mittelbaren Personenschäden: Herzinfarkte/Schlaganfälle/Wohnungsbrände etc.

Die Beispiele sind allgemein anwendbar auf Pkw, Lkw und Busse, müssen aber im Einzelfall genauer untersucht werden, da bspw. eine Frontalkollision mit einem Pkw und 30 km/h bedeutend ungefährlicher sein kann, als die gleiche Kollision mit einem Lkw.

Wie bereits in Kapitel 4.5 bei der Ableitung potenziell gefährlicher Szenarien angedeutet, wurde eine Differenzierung von potenziell gefährlichen Szenarien für geringe und mittlere Geschwindigkeiten vorgenommen. Diese Differenzierung beruht auf den beiden Begriffspaaren *geringe Geschwindigkeit* und *mittlere Geschwindigkeit*, welche zur Abstufung der Schadensschwere gemäß ISO 26262-3¹⁵⁰ verwendet werden. Die ISO 26262 selbst definiert kaum genaue Geschwindigkeiten. Stattdessen werden lediglich mittelhohe Geschwindigkeiten mit 50 km/h bis 90 km/h definiert^{151a} und immer wieder Geschwindigkeitswerte von ≤ 15 km/h und > 15 km/h^{151b} zur Erklärung bestimmter Sachverhalte innerhalb der Norm verwendet.

Mit Ausrichtung an diesen Werten gelten daher als Anhaltspunkte folgende Geschwindigkeitszuordnungen, welche jedoch im Einzelfall genauer zu betrachten sind.

- Sehr geringe Geschwindigkeiten: $v \leq 15$ km/h
- Geringe Geschwindigkeiten: $15 \text{ km/h} < v \leq 30 \text{ km/h}$
- Mittlere Geschwindigkeiten: $30 \text{ km/h} < v \leq 50 \text{ km/h}$
- Mittelhohe Geschwindigkeiten: $50 \text{ km/h} < v \leq 90 \text{ km/h}$

Anhand der Beispiele in der Tabelle 4-9 und der Geschwindigkeitswerte besteht die Möglichkeit, potenzielle Personenschäden Einzelfall abhängig zu bewerten. Bei Unsicherheit wird konservativ die höhere Kategorisierungsstufe verwendet. Im Zusammenhang von mittelbaren Personenschäden wird immer der höchste Wert angesetzt, da keine Informationen hinsichtlich einer Rettungsmission verfügbar sind, sodass immer der Worst Case angenommen wird.

Die zweite Dimension der Schadensschwere innerhalb der HARA bezieht sich, wie bereits erwähnt, auf potenzielle Missionsgefährdungen und damit verbundenen (Verkehrs-)Behinderungen und wird daher nachfolgend ebenfalls spezifiziert.

Spezifizierung von (Verkehrs-)Behinderungen hinsichtlich potenzieller Missionsgefährdungen

Die Kategorie S0 wird innerhalb der Missionsgefährdungen nur zugeordnet, wenn kein Zeitverzögerung zu erwarten ist und das Egofahrzeug keine (Verkehrs-)Behinderung darstellt. Steht dieses beispielsweise gegenüber von Grundstücksausfahrten mit ausreichend Raum zum Ein- und Ausfahren, so kann ohne Behinderung das Grundstück verlassen und die Fahrmission durchgeführt werden.

Eine Kategorisierung mit S1 bis S3 erfolgt in Anlehnung an die nachfolgenden Erläuterungen. Im Einzelfall sind jedoch spezifische Betrachtungen und Begründungen erforderlich.

S1 wird einer potenziellen Missionsgefährdung zugeordnet, wenn leichte Verkehrsbehinderungen oder Zeitverzögerungen zu erwarten sind. Steht ein fahrerloses Fahrzeug bspw. am Fahrbahnrand einer

¹⁵¹ ISO: ISO 26262-10:2018 (2018). a: S. 15; b: S. 14.

Straße und muss der Gegenverkehr abgewartet werden, um dieses zu passieren, so entsteht dadurch eine kurze Zeitverzögerung, welche die Fahrmission beeinträchtigt.

Die Kategorie S2 wird einer potenziellen Missionsgefährdung zugeordnet, wenn zur Missionserreichung mittlere (Verkehrs-)Behinderungen, also mittlere Zeitverzögerungen und/oder Umwege zu erwarten sind. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn durch den gewählten Halteort mittellange Verkehrsstaus entstehen.

Schließlich wird Kategorie S3 zugeordnet, wenn mit langen Zeitverzögerungen und/oder Umwegen zu rechnen ist oder die Missionserreichung nicht möglich ist. Werden bspw. Einbahnstraßen, Sackgassen oder Grundstücksausfahrten blockiert, so besteht die Möglichkeit, dass bspw. Anwohner nicht fähig sind, ihren Wohnort zu verlassen. Ähnliches gilt für die Blockade von Lieferzonen oder Halten über Schachtdeckeln, wenn dadurch die Ausführung bestimmter Arbeiten verhindert wird.

Zusammenfassung hinsichtlich der Schadensschwere

Zusammenfassend lässt sich die Schadensschwere gemäß den Erläuterungen in zwei Teilgebiete untergliedern. Im ersten Teil werden Personenschäden im Zusammenhang gefährlicher Szenarien betrachtet, welche anhand von Beispielen allgemein spezifiziert werden. Die spezielle Zuordnung eines Schadens ist jedoch vom Einzelfall abhängig zu untersuchen, da bspw. Geschwindigkeit, Kollisionsart und Fahrzeugart beeinflussende Variablen sind.

Der zweite Teil bezieht sich auf (Verkehrs-)Behinderungen im Zusammenhang von Missionsgefährdungen, welche hauptsächlich spezifiziert werden durch die Länge von Zeitverzögerungen und/oder Umwegen und durch die Möglichkeit, die beabsichtigten Missionsziele zu erreichen.

4.6.4 Zusammenfassung hinsichtlich der Risikodimensionen der HARA

Mit den drei erläuterten und spezifizierten Risikodimensionen (4.6.1 – 4.6.3) zur Durchführung der zweigeteilten HARA für Halteorte besteht nun die Möglichkeit, die bereits abgeleiteten gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen in Anhang 4 und Anhang 5 zu bewerten.

Übersichtshalber werden in nachfolgender Tabelle 4-10 noch einmal die Ergebnisse sowie Besonderheiten der einzelnen Risikodimensionen aufgelistet, um Zuordnungen von Rationalen und Bewertungen der Szenarien und Gefährdungen im nächsten Kapitel zu vereinfachen.

Tabelle 4-10: Zusammenfassende Kategorisierung der Risikodimensionen

	0	1	2	3	4
K: gefährliche Szenarien/Missionsgefährdungen	im Allgemeinen kontrollierbar	leicht kontrollierbar	normal kontrollierbar	schwer/nicht kontrollierbar	n.a.
Besonderheiten	Personenanteile, die durchschnittlich in der Lage sind einen Schaden/eine Gefährdung abzuwenden; Sichtweitenmodell für Kurven				
A: gefährliche Szenarien/Missionsgefährdungen	unmöglich	sehr geringe Wahrscheinlichkeit	geringe Wahrscheinlichkeit	mittlere Wahrscheinlichkeit	hohe Wahrscheinlichkeit
Besonderheiten	Haltedauer: 1h, Betrachtung der Häufigkeit des Auftretens; Poisson-Verteilung				
S: gefährliche Szenarien	keine Verletzungen	leichte bis mittlere Verletzungen	schwere bis lebensbedrohliche Verletzungen	lebensbedrohliche bis fatale Verletzungen	n.a.
S: Missionsgefährdungen	keine Behinderung	leichte Behinderungen (kurze Zeitverzögerungen/Umwege)	mittlere Behinderungen (mittlere Zeitverzögerungen/Umwege)	schwere Behinderungen (lange Zeitverzögerungen/Umwege), Missionen nicht durchführbar	n.a.
Besonderheiten	Beispiele für Personenschäden in Anlehnung an ISO 26262-3; Beispiele für Verkehrsbehinderungen				

4.7 Zuordnung von Rationalen und Bewertung

Die Zuordnung von Rationalen baut auf den erläuterten Risikodimensionen auf und muss in einem logischen Zusammenhang zu den angebrachten Beispielen und Erläuterungen stehen.

Im Fall von gefährlichen Szenarien in Kurvenbereichen resultiert das Rational der Kontrollierbarkeit für einen Halteort direkt aus den Berechnungen der Kontrollierbarkeitskategorien. Analog dazu resultieren Rationale der Auftretenswahrscheinlichkeit häufig aus Berechnungen der Wahrscheinlichkeitswerte mittels Poisson-Verteilung. Ist keine Zuordnung anhand einer Berechnung möglich, werden die Erläuterungen und Beispiele zu den einzelnen Risikodimensionen herangezogen und auf neue Sachverhalte übertragen, sodass sich Rationale ergeben, die in logischer Konsequenz dazu stehen.

Anschließend erfolgt die Bewertung auf Grundlage der Rationale. Bei Unsicherheit zwischen zwei Kategorien wird konservativ die höhere Kategorie gewählt.

Nachfolgend wird anhand dreier Beispiele die Zuordnung von Rationalen erläutert. Die vollständig durchgeführten Bewertungen für die identifizierten Szenarien und Gefährdungen gemäß Kapitel 4.5 sind in Anhang 4 und Anhang 5 aufgelistet.

Beispiel 1:

Gefährliches Szenario:

Eine Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben auf Parkplätzen, führt zu einer Kollision zwischen Fahrzeugen, da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.

K-Rational:

Verkehrsteilnehmer wissen, dass auf einem Parkplatz stehende Autos die Sicht einschränken können und passen ihr Fahrverhalten entsprechend an. Die Relativgeschwindigkeit ist sehr gering.

Eine Kontrollierbarkeit kann hier allgemein erwartet werden. → K0

A-Rational:

Parkplätze werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.

Die Übertragung der Ergebnisse der Poisson-Verteilung hinsichtlich der Verkehrsstärke auf Parkplätze ist prinzipiell möglich. Das gefährliche Szenario tritt bei jedem Haltevorgang von einer Stunde auf. → A4

S-Rational:

Die Relativgeschwindigkeit auf Parkplätzen ist sehr gering. Eine Kollision zwischen Fahrzeugen ruft i.d.R. keine Verletzungen hervor. → S0

Beispiel 2:

Gefährliches Szenario:

Durch eingeschränkte Sichtbarkeit des Egofahrzeugs, durch Stehenbleiben im Kurvenbereichen, kommt es zu einer Kollision, da dieses für nachfolgende Verkehrsteilnehmer zu spät sichtbar wird, um ein rechtzeitiges Anhaltemanöver zur Kollisionsvermeidung durchzuführen.

K-Rational:

Das Rational ist vom genauen Halteort der Kurve abhängig. Wird beispielsweise das Beispiel der Kurve aus Kapitel 4.6.1 gewählt ($R = 15 \text{ m}$; $a = 0,5 \text{ m}$; $b = 1,8 \text{ m}$; $\kappa = 90^\circ$; $\mu = 1,1$, $v_0 = 40 \text{ km/h}$) und hält das Egofahrzeug $l = 12 \text{ m}$ nach Kurvenbeginn an, so ergibt sich die Kontrollierbarkeit gemäß der Berechnungen im Beispiel. → K3

A-Rational:

Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass das Egofahrzeug durch andere Fahrer bei Kurvendurchfahrt rechtzeitig erkannt werden muss.

Die Anwendung der Poisson-Verteilung hinsichtlich der Verkehrsstärke zur Bestimmung einer Wahrscheinlichkeit ist hier prinzipiell möglich. Das gefährliche Szenario tritt bei jedem Haltevorgang von einer Stunde auf. → A4

S-Rational:

Im Falle einer K3 Einstufung sind die zu erwartenden Aufprallgeschwindigkeiten vergleichsweise hoch. Ein Auffahrunfall mit einem weiteren Fahrzeug und mittlerer Aufprallgeschwindigkeit kann lebensgefährliche/fatale Verletzungen hervorrufen. → S3

Beispiel 3:

Missionsgefährdung:

Eine Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben unmittelbar vor Grundstückseinfahrten/ -ausfahrten bzw. gegenüber von Ausfahrten, wenn der zur Verfügung stehende Straßenraum nicht zum Aus- oder Einfahren ausreichen würde, führt zu einer Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern.

K-Rational:

Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nicht passieren. Die Wahl einer alternativen Verkehrsrouten entfällt bei Grundstückseinfahrten /-ausfahrten. → K3

A-Rational:

Grundstückseinfahrten /-ausfahrten werden in Städten sehr häufig befahren, sodass eine Behinderung beim Ein-/ Ausfahren sehr wahrscheinlich ist.

Die Übertragung der Ergebnisse der Poisson-Verteilung hinsichtlich der Verkehrsstärke auf Grundstücksausfahrten ist prinzipiell möglich. Die Missionsgefährdung tritt bei jedem Haltevorgang von einer Stunde auf. → A4

S-Rational:

Die Fahrmission kann nicht durchgeführt werden. → S3

Anhand der aufgeführten Beispiele wird deutlich, dass die definierten Risikodimensionen genügend Informationen bzw. Erläuterungen und Anhaltspunkte zur Verfügung stellen, um geeignete Rationale hinsichtlich gefährlicher Szenarien bzw. Missionsgefährdungen zu formulieren und die entsprechenden Bewertungen vorzunehmen. Darauf aufbauend erfolgt schließlich im nächsten Kapitel die Bestimmung eines Risikolevels, welches dazu dient, die gewählten Halteorte innerhalb der Szenarien hinsichtlich ihrer Sicherheit und Eignung als Halteort zu identifizieren.

4.8 Definition und Zuordnung eines Risikolevels

Nach der Bewertung der potenziell gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen innerhalb der drei Risikodimensionen besteht die Möglichkeit Risikolevel (RL) zuzuordnen.

Für die möglichen Risikolevel werden die Bezeichnungen der ursprünglichen Automotive Safety Integrity Level zwar beibehalten (QM, A, B, C, D), jedoch nicht vor dem Hintergrund der Ableitung von Sicherheitszielen zur Erreichung funktionaler Sicherheit oder zur Anwendung bestimmter Qualitätsprozesse, um das identifizierte Risiko zu managen¹⁵². Stattdessen dient die Bezeichnung nur dazu, die Sicherheit bzw. Eignung eines Halteortes gemäß der Definition eines sicheren Halteortes (2.5) zu quantifizieren. Sofern die Klassifizierung des Risikolevels entweder

- die niedrigste Ausprägung aufweist (Kontrollierbarkeit im Allgemeinen, unmögliches Auftreten oder kein Schaden/keine Missionsgefährdung) und somit kein Risiko besteht oder

¹⁵² ISO: ISO 26262-3:2018 (2018), S. 8 f.

-
- mit dem QM-Level erfolgt,

wird die Annahme getroffen, dass das Risiko des Halteortes hinsichtlich valider, sozialer und moralischer Konzepte zumutbar ist. Somit ist ein potenzieller Halteort gemäß Definition sicher und als Halteort geeignet.

Die Zuordnung der RL kann entweder anhand Tabelle 4-1 der möglichen Kombinationsmöglichkeiten aus K1-K3 (bzw. C1-C3), A1-A4 und S1-S3 der ASIL erfolgen oder vereinfacht durch Addition der Zahlenwerte der einzelnen Dimensionen innerhalb eines potenziell gefährlichen Szenarios oder einer Missionsgefährdung. Die Summe der Zahlenwerte entspricht dann einem bestimmten Risikolevel:

- Summe: 1, 2, 3, 4, 5 oder 6 → QM
- Summe: 7 → A
- Summe: 8 → B
- Summe: 9 → C
- Summe: 10 → D

QM stellt das niedrigste und D das höchste Risikolevel dar. Wurde eine Kategorie mit „0“ bewertet, besteht unabhängig von den anderen Risikodimensionen innerhalb eines potenziell gefährlichen Szenarios oder einer Missionsgefährdung kein Risiko, sodass kein Risikolevel zugeordnet wird.

Beispiele:

- *Ein potenziell gefährliches Szenario wurde mit K3, A4 und S2 bewertet. Die Summe der Zahlen entspricht $3 + 4 + 2 = 9$, sodass das RL C zugeordnet wird.*
- *Eine Missionsgefährdung wurde K0, A4, S0 bewertet. Mindestens eine Kategorie weist den Wert „0“ auf, sodass kein RL zugeordnet wird.*

Treffen auf einen bestimmten Halteort mehrere gefährliche Szenarien und/oder Missionsgefährdungen zu, so ist das höchste bzw. risikoreichste RL ausschlaggebend zur Bewertung der Sicherheit. Die vollständigen Zuordnungen der Risikolevel hinsichtlich der identifizierten potenziell gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen sind den Ergebnissen der HARA in Anhang 4 und Anhang 5 zu entnehmen. Mit Hilfe dieser beiden Tabellen besteht die Möglichkeit, einem ausgewählten Streckenabschnitt alle auf diesen Abschnitt zutreffenden Szenarien bzw. Gefährdungen zuzuordnen. Daraus werden dann alle Halteorte bestimmt, die das Risikolevel für Sicherheit erfüllen, sodass eine Auswahl möglich ist.

Ist in einem bestimmten Streckenabschnitt kein sicherer Halteort vorhanden, besteht die Möglichkeit, einen anderen Streckenabschnitt zu befahren, um dort einen sicheren Halteort aufzusuchen. Dazu besteht jedoch das Erfordernis, einen Risikoabgleich zur Erreichung eines weiter entfernten Halteortes durchzuführen. Durch Vergleich des Risikos zur Erreichung dieses Halteortes und dem Risiko des risiko-minimalen aber unsicheren Halteortes im betrachteten Abschnitt, ist es dann möglich, den Ort

mit dem geringeren Gesamtrisiko auszuwählen. Die Risikoklassifizierung dient daher auch einem möglichen Risikoabgleich, was jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit darstellt.

4.9 Zusammenfassung der entwickelten Methodik

Die Methodik zur Identifikation von sicheren Orten für Nothaltemanöver fahrerloser Fahrzeuge wird nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

Ausgehend von der Erläuterung der Vorgehensweise einer Gefahrenanalyse und Risikobewertung bzw. HARA am Beispiel der ISO 26262¹⁵³, zur Erreichung von funktionaler Sicherheit (4.1), wurde das Vorgehen in den darauffolgenden Kapiteln mit detaillierten Erläuterungen und Definitionen auf die Problemstellung der Halteorte angepasst (4.2 – 4.6). Mit Hilfe der identifizierten Kriterien aus Kapitel 3 wurden potenziell gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen abgeleitet (4.5) und mit geeigneten Rationalen hinsichtlich der Risikodimensionen Kontrollierbarkeit, Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere (4.6.1 – 4.6.3) bewertet (4.7) und ein entsprechendes Risikolevel zugeordnet (4.8). Diese Risikolevel dienen als Ergebnis der HARA in Anhang 4 und Anhang 5 schließlich zur Identifikation von sicheren bzw. unsicheren Halteorten. Für einen Streckenabschnitt werden anhand der Ergebnisse der HARA alle anwendbaren gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen identifiziert, sodass sich daraus die potenziellen Halteorte ableiten lassen. Sind auf einen Halteort mehrere Szenarien oder Missionsgefährdungen anwendbar, so ist das höchste Risikolevel ausschlaggebend für das Gesamtrisiko. Zum besseren Verständnis wird das Vorgehen der Methodik zur Identifikation sicherer Orte für Nothaltemanöver im nachfolgenden Kapitel beispielhaft auf eine Referenzstrecke angewendet und anschließend die Ergebnisse der Arbeit diskutiert.

¹⁵³ ISO: ISO 26262:2018 (2018).

5 Beispielhafte Anwendung der Methodik auf eine Referenzstrecke

Die auf gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen beruhende Methodik zur Identifikation von sicheren Orten für Nothaltemanöver wird in diesem Kapitel beispielhaft auf verschiedene Streckenabschnitte einer Referenzstrecke angewendet. Dies dient dazu, die Tauglichkeit der entwickelten Methode zu demonstrieren und damit einen Beitrag zur Absicherung des Betriebs fahrerloser Fahrzeuge zu leisten.

Zur Anwendung der Methodik ist vorab die Auswahl einer geeigneten Referenzstrecke notwendig. Da sich der Einsatzort, der in dieser Arbeit betrachteten fahrerlosen Fahrzeuge, auf urbanes Gebiet beschränkt, bieten sich prinzipiell alle Routen innerhalb des städtischen Straßenverkehrs an. Die Auswahl einer Strecke ist daher willkürlich möglich, sodass diese im vorliegenden Fall anhand einer Strecke in Darmstadt getroffen wird, welche dem Autor bekannt ist. Startpunkt ist ein Parkhaus in der Bleichstraße nahe dem Klinikum in Darmstadt-Mitte. Von dort aus erstreckt sich die Route ein kurzes Stück über die Bundesstraße 3 (B3) und führt dann in Richtung Darmstadt-Nord über verschiedene städtische Straßen, bis hin zu einem anderen Parkhaus im Pallaswiesenviertel. Die Referenzstrecke ist insgesamt 1,3 km lang und wird nachfolgend in Abbildung 5-1 vollständig dargestellt. Startpunkt ist die gesetzte Stecknadel am Bildrand unten rechts und Zielpunkt die Stecknadel am Bildrand oben links.

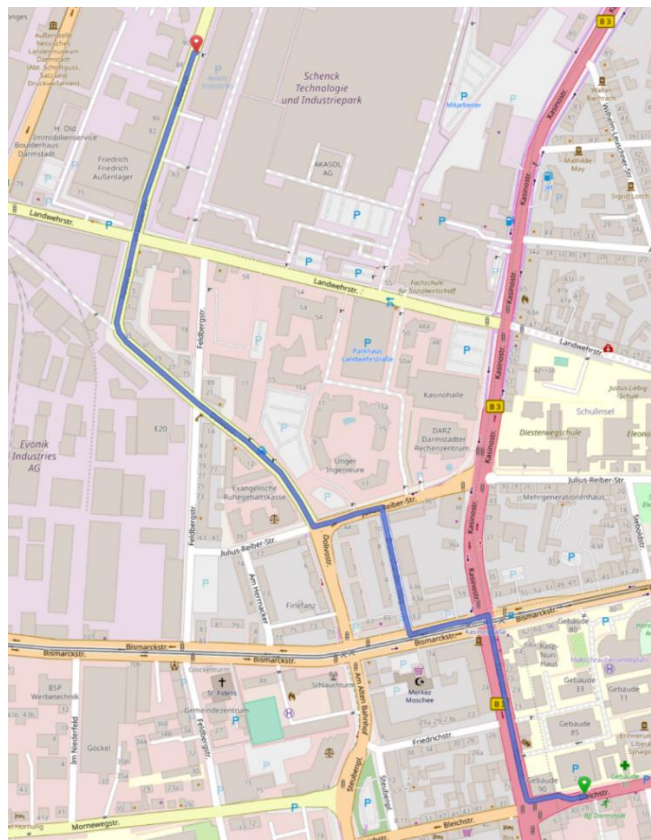


Abbildung 5-1: Referenzstrecke zur beispielhaften Anwendung der entwickelten Methodik¹⁵⁴

¹⁵⁴ OpenStreetMap-Mitwirkende: OpenStreetMap (2020).

Zerlegung der Referenzstrecke in Streckenabschnitte

Zur Anwendung der Methodik wird die ausgewählte Referenzstrecke in einzelne Streckenabschnitte unterteilt. Dies ermöglicht eine unabhängige Betrachtung. Ein solcher Streckenabschnitt wird in dieser Arbeit definiert als

Verbindungsstrecke zwischen zwei Knotenpunkten, wobei sich ein Knoten aus einer Kreuzung bzw. Einmündung oder einem Kreisverkehr ergibt. Ein Knoten dient dazu, einen befahrenen Streckenabschnitt wieder zu verlassen. Einfache Ein-/ Ausfahrten, bspw. Grundstückszufahrten, fallen nicht unter die Definition eines Knotens. Ein Knotenpunkt muss an mindestens zwei befahrbare Straßen angebunden sein. Geometrisch eng beieinander liegende Knoten werden zu einem Gesamtknoten zusammengefasst.

Anhand dieser Definition erfolgt die Einteilung der Referenzstrecke in 8 Streckenabschnitte. Die detaillierte Aufteilung ist in den Anhängen 10 – 11 dargestellt.

Anwendung der entwickelten Methodik auf ausgewählte Streckenabschnitte

Durch die Einteilung in Streckenabschnitte wird eine unabhängige Betrachtung voneinander ermöglicht, sodass nachfolgend zwei Abschnitte ausgewählt und die Methodik beispielhaft darauf angewendet wird. Für jeden Abschnitt werden anwendbare gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen identifiziert. Die in der Referenzstrecke vorhandenen Knotenpunkte, als Verbindung zweier Streckenabschnitte, müssen selbst nicht in der Methodik berücksichtigt werden. Diese bestehen hier lediglich aus Kreuzungen und Einmündungen, welche gemäß den harten Kriterien (3.2) nicht als potenzielle Halteorte zur Verfügung stehen.

Beispiel 1: Streckenabschnitt 1

Der Ausschnitt des ersten Streckenabschnitts innerhalb der Route ist in der Abbildung in Anhang 11 dargestellt. Zu Beginn der beispielhaften Anwendung wird die Szenerie vom Startpunkt der Route bis zur ersten Kreuzung mit der B3 analysiert. Diese Kreuzung weist zwei Abbiegefahrstreifen für Linksabbieger, einen Fahrstreifen zur Geradeausfahrt, sowie einen Abbiegestreifen für Rechtsabbieger auf. Zwischen den beiden Fahrstreifen zum Rechtsabbiegen und Geradeausfahren befindet sich ein Fahrradstreifen zur Geradeausfahrt, sowie am rechten Fahrbahnrand ein Fahrradstreifen, um rechts abzubiegen. Rechts neben der Fahrbahn befindet sich ein Gehweg mit angrenzenden Bäumen als harte laterale Begrenzung. Des Weiteren zu erkennen ist die Zufahrt zu einem Gebäude, sodass dies bspw. eine Lieferzone oder eine Grundstückzufahrt darstellt.

Die Umfeldanalyse erfolgt in der Realität anhand von Kartenmaterial und der Umfelderkennung eines automatisierten Fahrzeugs. Im Anschluss an diese Analyse werden aus den ermittelten gefährlichen Szenarien (1 bis 40) und Missionsgefährdungen (1 bis 24) gemäß den Anhängen 4 und 5 alle auf diesen Streckenabschnitt anwendbaren gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen identifiziert:

- Die anwendbaren Szenarien sind demnach Nr. 10/11/13/14/19/32 und 35.
- Die anwendbaren Missionsgefährdungen sind Nr. 8/9/19 und 24.

Trägt man diese anwendbaren Szenarien und Gefährdungen in einer Tabelle mit dem zugehörigen potenziellen Halteort und dem Risikolevel auf, so besteht schnell die Möglichkeit zu identifizieren, ob ein sicherer Halteort enthalten ist. Wichtig zu beachten ist, dass einem Halteort, sofern dieser mehrfach aufgelistet wird, das jeweils höchste Risikolevel zugeordnet wird, um eine Aussage über dessen Sicherheit zu treffen. Die nachfolgende Tabelle 5-1 fasst die Ergebnisse der Anwendung auf den Streckenabschnitt 1 zusammen.

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Anwendung der Methodik auf Streckenabschnitt 1

Nr. des gefährlichen Szenarios (g.S.) / der Missionsgefährdung (Mg.)	potenzieller Halteort	Risikolevel	sicherer Halteort (ja/nein)
g.S. 10	vor/auf Fußgängerüberwegen im Kreuzungsbereich	B	nein
g.S. 13	auf Radwegen/Fußwegen/Fußgängerüberwegen	D	nein
g.S. 14	z.T. auf Fußgänger-/ Radwegen	QM	ja
g.S. 11	im Kreuzungsbereich (5 m-Bereich)	C	nein
g.S. 19	am rechten Fahrstreifenrand/auf aktiven Fahrstreifen	-	ja
g.S. 32	am rechten Fahrstreifenrand mit angrenzendem Fußweg/Radweg	QM	ja
g.S. 35	auf aktiven links liegenden Fahrstreifen	B	nein
Mg. 8	Ladebuchten/Ladezonen	D	nein
Mg. 9	am rechten Fahrstreifenrand/auf aktiven Fahrstreifen	QM	
Mg. 19	vor Grundstückseinfahrten	D	nein
Mg. 24	vor Bordsteinabsenkungen	QM	ja

Das Halten auf den links liegenden Fahrstreifen kommt auf Grund des Unsicheren Verlassens des Egofahrzeugs in Grünphasen (g.S. 35) nicht in Frage. Ebenso ist der unmittelbare Kreuzungsbereich (g.S. 11), die vollständige Blockade von Radwegen (g.S. 13) sowie das Stehen vor der Grundstücksausfahrt (Mg. 19) nicht sicher bzw. nicht geeignet, da das definierte Grenzkrisiko durch das jeweilige Risikolevel überschritten wird.

Im ersten Streckenabschnitt ist es daher geeignet, entweder

- am rechten Fahrstreifenrand mit angrenzendem Radweg anzuhalten (g.S. 32) oder
- auf dem rechten aktiven Fahrstreifen (g.S. 19 und Mg. 9) aber nicht auf aktiven links liegenden Fahrstreifen (wegen g.S. 35) oder
- z.T. auf dem Radweg und z.T. auf dem angrenzenden Fußweg, sodass beide Verkehrsteilnehmer das Egofahrzeug ohne Ausweichen auf die Fahrbahn passieren können (g.S. 14).

Eventuell vorhandene Bordsteinabsenkungen schränken die Ergebnisse nicht ein, da die Bewertung mit dem QM-Level erfolgt.

Beispiel 2: Streckenabschnitt 7

Der Ausschnitt des siebten Streckenabschnitts innerhalb der Route ist in der Abbildung in Anhang 10 dargestellt. Im ersten Teil dieses Abschnitts befindet sich ein Parkstreifen auf der rechten Fahrbahnseite mit angrenzendem Fuß- und Radweg. Anschließend erstreckt sich der Abschnitt über eine scharfe Rechtskurve mit hohen Gebäuden im Kurveninneren und einer Werkszufahrt einer Firma im Kurvenäußeren. Danach verläuft der Abschnitt bis zu einer Kreuzung weiter geradeaus mit angrenzendem Fuß-/Radweg auf der rechten Seite. Auf dem Teilstück nach der Kurve befinden sich auf der linken Fahrbahnseite nutzbare Parkplätze. Die Fahrbahn ist einspurig mit nur einem schmalen Fahr-

streifen pro Fahrtrichtung. Der Abschnitt endet an einer Kreuzung, welche ebenfalls nur einen Fahrstreifen zur Geradeausfahrt und zum Abbiegen aufweist und einen Fahrstreifen für den Gegenverkehr. Analog zum Vorgehen für Streckenabschnitt 1, wurden hier folgende Halteorte anhand anwendbarer g.S. und Mg. identifiziert, welche in Tabelle 5-2 sortiert aufgelistet sind.

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Anwendung der Methodik auf Streckenabschnitt 7

Nr. des gefährlichen Szenarios (g.S.) / der Missionsgefährdung (Mg.)	potenzieller Halteort	Risikolevel	sicherer Halteort (ja/nein)
g.S. 1/2/3/4/17/28 und Mg. 5	auf Parkplätzen/Parkstreifen/Halbebuchten	-	ja
Mg. 18	auf Parkstreifen im Abstand von weniger als 50 cm zu anderen Kfz	D	nein
g.S. 5	in zweiter Reihe neben Parkstreifen	B	nein
g.S. 16	in zweiter Reihe neben Parkstreifen	A	nein
Mg. 2	in zweiter Reihe neben Parkstreifen	QM	ja
Mg. 4	an Stellen wo die Nutzung gekennzeichnete Parkflächen verhindert wird	QM	ja
g.S. 9	am Fahrbahnrand/auf dem rechten Fahrstreifen schmaler Straßen	B	nein
g.S. 32	am rechten Fahrstreifenrand mit angrenzendem Fußweg/Radweg	QM	ja
Mg. 11	am Fahrbahnrand mit nur einem schmalen Fahrstreifen in Fahrtrichtung	A	nein
g.S. 21	am Fahrbahnrand schmaler Straßen	QM	ja
g.S. 10	vor/auf Fußgängerüberwegen im Kreuzungsbereich	B	nein
g.S. 12	vor Radwegen im Kreuzungsbereich	B	nein
g.S. 11	im Kreuzungsbereich (5 m-Bereich)	C	nein
g.S. 24	vor Kreuzungen mit nur einem Fahrstreifen in Fahrtrichtung	A	nein
g.S. 13	vollständig auf Radwegen/Fußwegen/Fußgängerüberwegen	D	nein
g.S. 14	z.T. auf Fußgänger-/ Radwegen	QM	ja
g.S. 40	Kurvenbereiche: Siehe Modellberechnungen auf den Folgeseiten	kein RL bis D	ja/nein
Mg. 8	in Ladebuchten/Ladezonen	D	nein
Mg. 19	vor Grundstückseinfahrten	D	nein

Als potenzielle Halteorte kommen gemäß der Tabelle in Betracht:

- Parkplätze und Parkstreifen im Streckenabschnitt, sofern keine anderen Autos durch „Einklemmen“ blockiert werden (Mg. 18), sowie das Halten z.T. auf dem Fuß- bzw. Radweg und teilweise auf der Fahrbahn, da hierdurch kein gefährliches Szenario oder eine Missionsgefährdung ausgeht (g.S. 14).
- Das Parken in zweiter Reihe stellt keine Option dar, da das höchste Risikolevel bezüglich dieses Halteortes (g.S. 5) das Grenzkriterium überschreitet, sodass die anderen Szenarien/Gefährdungen mit geringerem RL dominiert werden. Das Parken an Stellen, wo die Nutzung gekennzeichnete Flächen verhindert wird, ist hinsichtlich der Missionsgefährdungen prinzipiell möglich (Mg. 4), stellt jedoch im Hinblick auf gefährliche Szenarien durch Parken in zweiter Reihe keinen sicheren Halteort dar und wird daher dominiert. Das Halten am rechten Fahrbahnrand wird von dem gefährlichen Szenario 9 und der Missionsgefährdung 11 dominiert und ist unsicher, da auf dem kompletten Streckenabschnitt der Fahrstreifen schmal ist. Beim Passieren des Egofahrzeugs besteht das Risiko einer Kollision mit dem Gegenverkehr (g.S. 9) oder es besteht eine Missionsgefährdung, da nachfolgende Fahrzeuge in den Gegenverkehr ausweichen müssen, um das Fahrzeug zu passieren (Mg. 11). Zudem stellt das Halten vor oder auf Fußgängerwegen/Fußgängerüberwegen oder Radwegen vor dem Kreuzungsbereich, sowie im 5-Meter-Bereich einer Kreuzung keinen sicheren Halteort dar. Auf Grund der identifizierten harten Kriterien (siehe Kapitel 3.2) kommt die Zufahrt auf das Firmengelände auf Grund von potenziellen Rettungs-/ Einsatzfahrten als Halteort nicht in Betracht. Zudem dient

die Zufahrt dem Lieferverkehr und ist daher auf Grund der Missionsgefährdung 8 ebenfalls nicht geeignet.

Hinsichtlich des gefährlichen Szenarios Nr. 40, d.h. zur Untersuchung des Kurvenbereichs als möglicher Halteort, ist die Betrachtung anhand des entwickelten Sichtweitenmodells prinzipiell nicht erforderlich. Dies wird dadurch begründet, dass der rechte Fahrbahnrand gemäß g.S. 9 und Mg. 11 bereits als unsicherer Halteort klassifiziert wurde. Dennoch wird nachfolgend die Betrachtung anhand einer realen Kurve nochmals durchgeführt, um die Tauglichkeit des Sichtweitenmodells zu testen. Da bezüglich der Kurve keine Informationen zu Radius und Kurvenwinkel zur Verfügung stehen, wurde anhand einer geometrischen Näherung in Abbildung 5-2 der Kurvenwinkel bestimmt zu $\kappa = 60^\circ$.



Abbildung 5-2: Geometrische Winkelnäherung der Kurve in Streckenabschnitt 7

Anhand von Satellitenbildern wurde mittels Google Earth¹⁵⁵ ein Modell gebildet, welches den Straßenabschnitt widerspiegelt (siehe Anhang 12). Daraus wurde der Radius R zur Mitte des rechten Fahrstreifens zu ca. 25 m bestimmt, sowie die halbe Fahrstreifenbreite b zu ca. 1,8 m und der Abstand a vom Fahrbahnrand bis zum Sichthindernis zu ca. 2 m.

Da sich die Kurve in einer 50 km/h-Geschwindigkeitszone befindet, wird $v_0 = 60$ km/h gemäß des Sichtweitenmodells aus Kapitel 4.6.1 angesetzt. Mit Formel (4-2) und den Reaktionszeiten $t_R = 1,2$ s/1,7 s/2,2 s folgt für die erforderlichen Anhaltewege bei Trockenheit, gerundet auf zwei Nachkommastellen, $s_{\text{erf}} = 32,87$ m/41,2 m/49,53 m (für die Kontrollierbarkeitsstufen K3/K2/K1). Da diese Werte sehr hoch erscheinen und dem Autor die Kurve bekannt ist, kann hier davon ausgegangen werden, dass die Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h durch Orientierung an der Geschwindigkeitszone hier zu hoch angesetzt wurde. Stattdessen wird ein realistischer Wert von $v_0 = 40$ km/h gewählt, mit welchem die weiteren Rechnungen erfolgen. Die neuen erforderlichen Anhaltewege ergeben sich daher zu $s_{\text{erf}} = 26,20$ m/31,76 m/37,32 m für K3/K2/K1.

Die vorhandenen Anhaltewege müssen diese Werte übersteigen ($s_{\text{vor}} > s_{\text{erf}}$), damit die Bedingung (4-1) für die Kontrollierbarkeiten K3/K2/K1 erfüllt werden.

¹⁵⁵ Google Earth (2020).

Zur Erfüllung von *Fall 0* ($l < \frac{2\pi R\alpha}{360}$), d.h. dass keine Sichtbehinderung durch die Wahl des Halteortes besteht, muss $l < 13,96$ m sein.

Fall 1 ($\frac{2\pi R\alpha}{360} \leq l < \frac{4\pi R\alpha}{360}$ und $l < l_{\text{ges}}$) ist erfüllt, wenn $13,96 \text{ m} \leq l < 27,93 \text{ m}$ und $l < 26,18 \text{ m}$. Da die gesamte Kurvenlänge nur $l_{\text{ges}} = 2\pi \cdot 15 \text{ m} \cdot \frac{53^\circ}{360^\circ} = 26,18 \text{ m}$ beträgt, entfällt *Fall 2* aus der Betrachtung, da dessen Bedingung ($\frac{4\pi R\alpha}{360} \leq l < l_{\text{ges}}$) nicht erfüllt wird und zu keinem Zeitpunkt eine Sichteinschränkung vorliegt, bei welcher sich beide Fahrzeuge innerhalb der Kurve befinden.

Durch Variation von l innerhalb der Formel des vorhandenen Anhaltewegs für *Fall 1* (siehe Anhang 7) ergibt sich ein Wert von:

- $l = 18,49$ m, für den der vorhandene Anhalteweg gerade noch dem erforderlichen Anhalteweg zur Einstufung von K1 entspricht, bzw. ein Wert von
- $l = 20,6$ m, für den der vorhandene Anhalteweg gerade noch dem erforderlichen Anhalteweg zur Einstufung von K2 entspricht.

Alle Werte für $l > 20,6$ m entsprechen der K3 Einstufung, solange die Bedingungen für *Fall 1* erfüllt wird und sich das Egofahrzeug innerhalb der Kurve befindet ($13,96 \text{ m} \leq l < 26,18 \text{ m}$).

Fall 2 wird, wie erwähnt, nicht betrachtet, da innerhalb dieses Falls keine Sichteinschränkung besteht. Stattdessen wird erst *Fall 3* wieder untersucht, d.h. ein Folgefahrzeug befindet sich innerhalb der Kurve und das Egofahrzeug am Fahrbahnrand nach der Kurve. Durch das Vorgehen analog zu *Fall 1*, nähert man mit der Formel des vorhandenen Anhaltewegs für *Fall 3* (siehe Anhang 9) l so an, sodass die vorhandenen Anhaltewege mindestens den erforderlichen Anhaltewegen für die entsprechenden Kontrollierbarkeitsstufen entsprechen. Daraus können zusammen mit den Ergebnissen für *Fall 1* die Intervalle der Kontrollierbarkeitsbereiche gemäß Tabelle 5-3 bestimmt werden.

Tabelle 5-3: Kontrollierbarkeitsbereiche der Kurve in Abhängigkeit der Intervalllänge l

Fall	Kontrollierbarkeit	Intervall l	Risikolevel
0	K0	$l < 13,96 \text{ m}$	K0, A4, S0 → kein RL
1	K1	$13,96 \text{ m} \leq l < 18,49 \text{ m}$	K1, A4, S1 → QM
1	K2	$18,49 \text{ m} \leq l < 20,6 \text{ m}$	K2, A4, S2 → B
1	K3	$20,6 \text{ m} \leq l < 26,18 \text{ m}$	K3, A4, S3 → D
3	K3	$26,18 \text{ m} \leq l < 37,35 \text{ m}$	K3, A4, S3 → D
3	K2	$37,35 \text{ m} \leq l < 45,01 \text{ m}$	K2, A4, S2 → B
3	K1	$l > 45,01 \text{ m}$	K1, A4, S1 → QM

Es ist ersichtlich, dass ein großer Anteil der Kurve zu Beginn keine Sichteinschränkung darstellt (*Fall 0*). Darauf folgen für *Fall 1* zwei kleinere Bereiche, in denen die Kontrollierbarkeit sinkt, d.h. zuerst auf K1 und dann auf K2. Anschließend beträgt die Kontrollierbarkeit K3, bis zu einem Bereich von $37,35 \text{ m} - 26,18 \text{ m} = 11,17 \text{ m}$ nach der Kurve und steigt dann wieder auf K2 und K1. Da gemäß dem g.S. 40 die Schadensschwere der Kontrollierbarkeitskategorie entspricht und die Auftretenswahrscheinlichkeit mit A4 bewertet wird, ergeben sich die Risikolevel für die einzelnen Intervalle gemäß der rechten Tabellenspalte. Diese Risikolevel werden anschließend in Tabelle 5-2 übertragen und dienen damit zur Gesamtauswertung des Streckenabschnitts 7 hinsichtlich der sicheren Halteorte.

Die beiden durchgeführten Beispiele bestätigen die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik auf Routen und verschiedene Streckenabschnitte. Die Methodik liefert als Ergebnis mögliche sichere und unsichere Halteorte mit zugehöriger Risikoklassifizierung. Anhand der Definition sicherer Halteorte lässt sich mit dem Grenzkrisiko eine Aussage über die Sicherheit treffen. Des Weiteren legt die Methodik die Grundlage zur Durchführung eines Risikoabgleichs durch Vergleich des Risikolevels eines Halteorts mit dem Risiko zur Zielerreichung dieses Ortes.

6 Diskussion der Ergebnisse

Zu Beginn dieser Arbeit wurde eine ausführliche Literaturrecherche mit Fokus auf der Absicherung automatisierter bzw. fahrerloser Fahrzeuge durchgeführt. Ziel dieser Recherche war es, den Stand der Technik hinsichtlich der Rückfallebene *Sicheres Anhalten* mit Fokus auf sicheren Halteorten zu untersuchen. Außerdem bestand die Notwendigkeit, ein Verständnis bezüglich relevanter Begriffe und Definitionen zu entwickeln, um eine methodische Grundlage für das weitere Arbeitsvorgehen zu schaffen.

In diesem Zusammenhang wurde daher vorerst eine Abgrenzung der Automatisierung, Fahrerlosigkeit und Autonomie vorgenommen. Obwohl im Alltag häufig von autonomen Fahrzeugen gesprochen wird, ist die Verwendung dieses Begriffspaares häufig missverständlich. Daher wurde dieses im weiteren Verlauf der Arbeit und hinsichtlich des Projekts UNICAR*agil* durch fahrerlose bzw. automatisierte Fahrzeuge ersetzt.

Anschließend wurde anhand verschiedener Quellen und insbesondere der Norm ISO 26262 für funktionale Sicherheit von Straßenfahrzeugen, ein detailliertes Sicherheitsverständnis geschaffen. Neben einer allgemeinen Sicherheitsdefinition, als Abwesenheit eines unzumutbaren Risikos, wurde das Risiko und dessen Zumutbarkeit im Hinblick gesellschaftlich moralischer Aspekte sowie der risikominimale und sichere Zustand erläutert. Die Ergebnisse hieraus wurden wiederum zur Definition eines sicheren Halteortes zusammengeführt, dessen Bedeutung für die Methodenentwicklung von entscheidender Relevanz ist.

Im Sinne der fahraufgabenspezifischen Absicherung und im Fokus der Literaturrecherche wurden zudem das sichere Anhalten als Rückfallebene und die damit einhergehende Systemdegradation, spezifiziert. Die Degradation ermöglicht es, das Fahrzeug im Fall einer Systemgrenzüberschreitung wieder in einen sicheren Zustand zu überführen. Neben der sicheren Erreichung eines Stillstands, ist der Zielort entscheidend für die Einhaltung eines zumutbaren Grenzkrisikos und eines sicheren Zustands. Daher besteht die Notwendigkeit der Identifikation sicherer Halteorte.

Als Ergebnis der Spezifizierung des sicheren Anhaltens wurden außerdem Ursachen identifiziert, welche eine Systemdegradation hervorrufen. Dazu zählen insbesondere interne Ursachen wie technische Fehler des Fahrzeugführungssystems oder des Fahrzeugs selbst, welche zu verringerten funktionalen Fähigkeiten, also einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit führen. Auch externe Ursachen wie veränderte Umweltbedingungen können eine Systemdegradation hervorrufen. Diese stellen nicht den Fokus der funktionalen Sicherheit dar, da in der Regel kein Einfluss darauf möglich ist. Dennoch besteht die Möglichkeit, dass diese zu einer Systemdegradation führen und ein sicheres Anhalten notwendig machen.

Im Zusammenhang interner Ursachen beschreibt die funktionale Sicherheit die Abwesenheit eines unzumutbaren Risikos infolge möglicher Gefährdungen, hervorgerufen durch fehlerhaftes Systemverhalten. Das Risiko wiederum stellt innerhalb dieser Arbeit und insbesondere hinsichtlich der Gefahrenanalyse und Risikobewertung (HARA) eine Kombination aus Kontrollierbarkeit, Auftretens-

wahrscheinlichkeit und Schadensschwere dar. Da ein Risiko von einer Situation bzw. von einem gefährlichen Szenario oder einer Missionsgefährdung abhängig ist, wurde ebenfalls im ersten Teil der Arbeit eine Differenzierung der Begriffe Szene, Situation und Szenario durchgeführt.

Die Recherche diente zudem dazu, eine Sichtung der Literatur hinsichtlich sicherer und unsicherer Halteorte vorzunehmen. Aus den Ergebnissen wurden initiale Kriterien möglicher Halteorte abgeleitet, um eine Idee zur Kategorisierung zu entwickeln. Ebenso bildeten diese Ergebnisse die Grundlage zur finalen Definition eines sicheren Halteortes, welche sich auf eine zweigeteilte HARA hinsichtlich gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen stützt und dadurch ein quantifizierbares Risiko zur Beurteilung der Sicherheit bereitstellt. Zur Abgrenzung der Sicherheit bestand die Notwendigkeit der Definition eines geeigneten Grenzrisikolevels. Diese Definition stützt sich auf die Annahme, dass die fehlende Notwendigkeit zur Formulierung von Sicherheitszielen hinsichtlich des Risikolevels QM innerhalb der ursprünglichen HARA, die Sicherheit von Halteorten bei der angepassten HARA begründet, wenn diesen kein Risikolevel oder das QM-Level zugeordnet wird.

Obwohl ein Ergebnis der Literaturrecherche war, dass eine Abhängigkeit zwischen dem zumutbaren Risiko und dem Nutzen einer Technologie besteht, wird dies bei der Definition des Grenzrisikos mangels geeigneter Metriken nicht berücksichtigt. Dennoch hat sich die Definition des zumutbaren Risikos anhand der Risikolevel in dieser Arbeit als zweckmäßig erwiesen, um eine erste Abgrenzung zwischen der Sicherheit und Unsicherheit von Halteorten vorzunehmen.

Im anschließenden Teil der vorliegenden Arbeit wurde auf Grundlage der Definitionen und auf Basis der bereits identifizierten Kriterien eine methodische Identifikation weiterer Kriterien und deren Kategorisierung vorgenommen. Dazu wurden anhand eines Brainstormings sowie dreier Fehlerbaumanalysen verschiedene Erkenntnisse gewonnen. Aus dem Brainstorming gingen als Ergebnis verschiedene Haupt- und Unterkriterien hervor. Die Hauptkriterien wurden größtenteils innerhalb der HARA verwendet, um Kategorien für verschiedene gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen zu definieren. Durch die Wahl dreier unerwünschter Folgen von potenziellen Halteorten wurde die Ausgangslage zur Durchführung der Fehlerbaumanalysen geschaffen und daraus straßenlayoutbezogene Ursachen bzw. Kriterien identifiziert. Durch Kombination der Kriterien untereinander sowie durch Kombination mit den Unterkriterien des Brainstormings dienten diese im Hauptteil der Arbeit als Input zur Durchführung der HARA. D.h. die Kriterien wurden genutzt, um gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen zu formulieren.

Als Resultat dieser erläuterten und angewendeten Methoden wurden vielfältige und mehrdimensionale Kriterien identifiziert. Dennoch sind die Ergebnisse auf Grund der Subjektivität bei der Durchführung keines Falls taxativ, sodass eine erneute Anwendung, etwa durch andere Personen, andere Ergebnisse und eventuell auch weitere Gedankengänge liefert. Im Sinne der Entwicklung einer Methodik zur Identifikation von Orten für Nothaltemanöver sind die identifizierten Kriterien dennoch ausreichend. Dies wird dadurch begründet, dass einem Halteort bei dessen Betrachtung in der Regel ohnehin mehrere gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen zugeordnet werden, um dessen potenzielle Eignung eingrenzen (siehe hierzu die Anwendung in Kapitel 5): Zudem besteht die Möglichkeit, im Laufe der Zeit sukzessive weitere gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen zu definieren.

Im weiteren Verlauf dieses übergeordneten Kapitels der Identifikation wurden zusätzlich harte Kriterien herausgearbeitet, welche einen Halteort ausschließen, da bestimmte gesetzliche oder gesellschaftlich moralische Aspekte zu einem nicht zumutbaren Risiko führen. Diese Kriterien wurden daher bei der Durchführung der HARA nicht mehr betrachtet. Stattdessen wurden zusätzlich, größtenteils auf Basis gesetzlicher Bestimmungen, Kriterien hoher Priorität identifiziert, die in der HARA berücksichtigt wurden.

Im Hauptteil der Arbeit wurde schließlich allgemein das Vorgehen einer HARA anhand der ISO 26262 zur Erreichung von funktionaler Sicherheit erläutert. Anschließend wurden die notwendigen Anpassungen zur Anwendung der Methode auf Halteorte erläutert. Dazu zählt beispielsweise die zweigeteilte Durchführung für gefährliche Szenarien einerseits und Missionsgefährdungen andererseits. Diese Zweiteilung resultiert aus den unerwünschten Folgen der Fehlerbaumanalysen.

Des Weiteren bestand die Notwendigkeit, die Risikodimensionen der Kontrollierbarkeit, Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere, sowie das Risikolevel im Kontext der Zweiteilung neu zu definieren und auf die Begriffe eines gefährlichen Szenarios und einer Missionsgefährdung einzugehen.

Als Ergebnis stellt eine Missionsgefährdung eine Behinderung bestimmter Beförderungsaktivitäten oder Aufträge dar, deren Durchführung nicht oder nur mit Umwegen und/oder Zeitverlusten möglich ist. Potenziell gefährliche Szenarien sind im Gegensatz dazu das Resultat einer Verknüpfung mehrerer objektiver Szenenelemente durch Aktionen und Ereignisse, die in Gesamtheit dazu führen, dass das zumutbare Risiko hinsichtlich des Hervorrufens unmittelbarer oder mittelbarer Personenschäden potenziell überschritten wird. Anhand dieser Definitionen und auf Grundlage der identifizierten Kriterien wurden anschließend gefährliche Szenarien anhand vierer Hauptkriterien des Brainstormings durch Kombination mit den Unterkriterien und straßenlayoutbezogenen Kriterien abgeleitet. Als Ergebnis wurden insgesamt 40 gefährliche Szenarien innerhalb der Kategorien *Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug*, *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug*, *Verlassen des Egofahrzeugs* und *Sichtbarkeit des Egofahrzeugs* formuliert und in einer Tabelle in Anhang 4 zusammengetragen. Analog wurden 24 Missionsgefährdungen innerhalb der Kategorie *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug* in Anhang 5 zusammengetragen. Zusammenfassend wurden auf diese Weise zahlreiche und vielfältige Ergebnisse generiert. Durch Bewertung der postulierten Szenarien und Gefährdungen wurde anschließend eine Aussage über die Sicherheit eines Halteortes möglich. In diesem Kontext wurden die Kontrollierbarkeit, die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Schadensschwere in Anlehnung an die HARA der ISO 26262 und anhand eigener Modifikationen, Modelle und Berechnungen angepasst und neu definiert.

Als Ergebnis wurde die Kontrollierbarkeit durch verschiedene Erläuterung einerseits und andererseits durch Anteile von Personen, welche in der Lage sind, gefährliche Szenarien oder Missionsgefährdungen zu kontrollieren, definiert. Zudem wurde ein ausführliches Sichtweitenmodell für Rechtskurven und Linkskurven von Richtungsfahrbahnen entwickelt. Dieses Modell besteht aus drei verschiedenen Fällen und dient dazu, unter Annahme bestimmter Variablen wie bspw. Reaktionszeiten und Reibwerten, ausgewählte Kurven innerhalb eines Streckenabschnitts in Kontrollierbarkeitsbereiche einzuteilen, sodass eine Aussage über das Risiko eines Halteortes möglich ist. Die spätere beispielhafte

Anwendung des Modells zeigt dessen Eignung anhand eines realen Streckenabschnitts, wengleich auf Grund der Modellannahmen Unsicherheiten bestehen. Neben den bereits genannten Annahmen bestimmter Reaktionszeiten und Reibwerte werden beispielsweise die Vereinfachungen getroffen, dass Bremswege in Kurven und auf Geraden gleich lang sind, mögliche Gefälle oder Steigungen keinen Einfluss auf den Bremsweg nehmen sowie, dass Sichtverdeckungen unabhängig von der Topologie immer vollständig die Sicht einschränken oder dass Objekte sofort für das menschliche Auge sichtbar werden, sobald der Sichtstrahl zwischen Aug- und Zielpunkt nicht mehr unterbrochen ist. Zudem gilt das Modell für die Annahme, dass sich Aug- und Zielpunkt auf halber Fahrstreifenbreite des kurveninneren Fahrstreifens befinden. Trotz dieser Unsicherheiten, sowie des Problems der Datenerhebung benötigter Kurvenradien, Kurvenwinkel, Fahrstreifenbreiten und Abständen zu Sichthindernissen, bildet das Modell eine erste Idee und Näherung zur Definition der Kontrollierbarkeit durch andere Verkehrsteilnehmer in Kurvenbereichen.

Als Ergebnis der Definition der zweiten Risikodimension innerhalb der HARA für Halteorte, wird die Auftretenswahrscheinlichkeit in zweierlei Hinsicht betrachtet. Zum einen bezieht sich diese auf die Haltedauer eines Egofahrzeugs, welche in der Regel unabhängig ist vom Halteort. In dieser Arbeit wird diese daher einheitlich und konservativ geschätzt mit einer Stunde angesetzt, damit in der Realität ausreichend Zeit zur Verfügung steht, das Egofahrzeug im Falle des sicheren Anhaltens von seinem gewählten Zielstandort zu entfernen. Zum anderen ist die Wahrscheinlichkeit abhängig von der Häufigkeit des Auftretens gefährlicher Szenarien oder Missionsgefährdungen. Für den Fall, dass eine Behinderung von Rettungsfahrten oder anderer Verkehrsteilnehmer vorliegt, wurde die Wahrscheinlichkeit mit der Poisson-Verteilung und bestimmten Modellannahmen berechnet. Hinsichtlich der Rettungsfahrten wurde eine Statistik zur durchschnittlichen Anzahl von Rettungsfahrten pro Einwohner in Deutschland herangezogen und diese mit Hilfe der Einwohnerzahl und der Länge des Streckennetzes in Darmstadt beispielhaft auf einen 1 km langen Streckenabschnitt bezogen. Mittels Poisson Verteilung wurde daraus dann die Wahrscheinlichkeit für das gefährliche Szenario der Blockade eines Rettungsfahrzeugs auf diesem Streckenabschnitt berechnet. Trotz der starken Vereinfachung durch die Modellannahmen und den damit behafteten Unsicherheiten, bieten auch diese Berechnungen ein erstes Indiz, um solche Szenarien hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeit zu bewerten und sind daher im Sinne dieser Arbeit zweckmäßig zur Bestimmung der Sicherheit von Halteorten. Ähnlich wurden andere gefährliche Szenarien und Missionsgefährdungen, ohne den Zusammenhang zu Rettungsfahrten, anhand von Auslegungszahlen der Verkehrsstärke bestimmter Straßenquerschnitte und der Poisson-Verteilung hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeiten bewertet. Weitere Auftretenswahrscheinlichkeiten, welche nicht in diesem Zusammenhang standen, wurden in Anlehnung an die ISO 26262 nach einer konservativen Schätzung der Auftretenshäufigkeiten in bestimmten Zeiträumen bewertet. Auch hier besteht eine Unsicherheit hinsichtlich des Ergebnisses, welche aber auf Grund ihrer Konservativität in Kauf genommen wird, um im Endergebnis eine Risikobeurteilung zu erzielen.

Die Schadensschwere als letzte Risikodimension wurde hinsichtlich gefährlicher Szenarien größtenteils anhand von Beispielen in Anlehnung an die ISO 26262 spezifiziert und um grobe Geschwindigkeitsangaben erweitert. Dies dient der vereinfachten Zuordnung eines potenziellen Schadens im zu

betrachtenden Einzelfall. Die Besonderheit bei mittelbaren Personenschäden besteht darin, dass auf Grund potenzieller Zeitverzögerungen und fehlender Information über einen Rettungseinsatz, konservativ immer der höchste Wert der Schadensschwere angesetzt wurde. Hinsichtlich der Missionsgefährdungen wurden mögliche Zeitverzögerungen oder die Länge von Umwegen zur Differenzierung der Schadenskategorien herangezogen, wenngleich keine minutengenaue oder kilometerbezogene Differenzierung durchgeführt wurde. Dies ist auf Grund fehlender Informationen zu den Missionen anderer Personen auch nicht möglich. Zudem sind eine Vielzahl weiterer Parameter bei der Betrachtung möglicher Zeitverzögerungen relevant, wie bspw. die allgemeine Verkehrslage. Dies stellte daher eine Schwierigkeit bei der Bewertung dar, sodass im Grunde genommen auf subjektive Erfahrungswerte zurückgegriffen wurde, die eine potenzielle Zeitverzögerung oder Umwege innerhalb eines Szenarios oder bei Auftreten einer Gefährdung widerspiegeln. Das Vorgehen war zwar auch hier hinsichtlich einer Risikoeinteilung von möglichen Halteorten zweckmäßig, jedoch werden gleichzeitig Verbesserungspotenziale aufgezeigt.

Auf Grundlage der definierten und spezifizierten Risikodimensionen wurde im Anschluss daran die Zuordnung geeigneter Rationale, für die insgesamt 64 identifizierten gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen, durchgeführt. Schließlich erfolgte die Spezifizierung der möglichen Risikolevel durch Übernahme der ASIL-Bezeichnungen QM, A, B, C und D. Dies geschah jedoch nicht vor dem Hintergrund der Ableitung von Sicherheitszielen zur Erreichung funktionaler Sicherheit oder zur Anwendung bestimmter Qualitätsprozesse. Stattdessen wurden die Bezeichnungen beibehalten, um deren gewohnte Zuordnung zu erleichtern und dadurch dennoch eine Aussage über Sicherheit bzw. Eignung eines Halteortes gemäß der Definition eines sicheren Halteortes zu erhalten.

Durch dieses Vorgehen bestand zusammenfassend die Möglichkeit, wenn auch unter vielen Annahmen und damit verbundenen Unsicherheiten, die entwickelte Methodik auf verschiedene Streckenabschnitte innerhalb einer Referenzstrecke anzuwenden. Der Katalog der gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen wurde dazu auf einen Streckenabschnitt angewendet, indem alle auf diesen Abschnitt zutreffenden Szenarien oder Gefährdungen, nach Halteorten sortiert, aufgelistet wurden. Anschließend wurde für jeden Halteort das Szenario oder die Gefährdung mit dem höchsten Risiko als ausschlaggebendes Gesamtrisiko klassifiziert, sodass dadurch andere Szenarien oder Gefährdungen dominiert wurden.

Die beispielhafte Anwendung auf eine Referenzstrecke in Darmstadt zeigt als Endergebnis, dass die entwickelte Methode innerhalb der vorliegenden Arbeit als Grundlage zur Entscheidung über die Sicherheit bestimmter Halteorte innerhalb eines Streckenabschnitts angewendet werden kann. Die Methodik weist zudem einige Potenziale hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit sowie hinsichtlich möglicher Verbesserungen auf, welche im Rahmen des Ausblicks im nachfolgenden Kapitel erläutert werden.

7 Ausblick

Wie bereits im vorangehenden Kapitel erläutert, wurden innerhalb der entwickelten Methodik verschiedene Annahmen getroffen. Dies war hinsichtlich des Ziels der Arbeit, d.h. der Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Identifikation sicherer Halteorte zweckmäßig, um im verfügbaren Zeitrahmen zu einem anwendbaren Endergebnis zu gelangen. Da jedoch (Modell-)Annahmen immer mit Unsicherheiten behaftet sind, besteht die Notwendigkeit in zukünftigen Untersuchungen und Forschungen diese Annahmen weitestgehend zu eliminieren und durch geeignete Fakten, Metriken o.Ä. zu konkretisieren.

Dies bedeutet, dass beispielsweise zur Definition eines sicheren Halteortes ein Bezug zwischen dem Grenzkrisikos und dem Nutzen einer Technologie hergestellt wird, da in dieser Hinsicht eine Abhängigkeit besteht, die mangels geeigneter Metriken jedoch nicht berücksichtigt wurde. Zudem besteht die Notwendigkeit, den subjektiv identifizierten Kriterien mehr Objektivität beizumessen, indem bspw. Brainstormings im Plenum oder unabhängig voneinander durch verschiedene Einzelpersonen durchgeführt werden, um anschließend die vielfältigen Ergebnisse zusammenzuführen und auszuwerten. Gleiches gilt für die Fehlerbaumanalysen, um ausgehend von eventuell noch nicht betrachteten unerwünschten Folgen neue Ursachen zu identifizieren, die durch die Wahl eines Halteortes beeinflusst werden. Auch bei der Auswertung der Kriterien, sowie der Zusammenfassung zu Kategorien und schließlich bei der Ableitung potenziell gefährlicher Szenarien und Missionsgefährdungen ist es möglich, eine Vielzahl von Personen einzubinden, um den Ergebnisraum zu vergrößern und eine größere Vielfalt zu erreichen. Das Hinzuziehen von Daten aus dem Realverkehr bietet zudem weitere Potenziale hinsichtlich der Identifikation, wenngleich bei der fahraufgabenspezifischen Absicherung versucht wird, eine merkmalsbasierte Freigabe von Streckenabschnitten für fahrerlose Fahrzeuge zu erreichen. Des Weiteren bestehen, wie bereits beschrieben, verschiedene Verbesserungspotenziale im Kontext der einzelnen Spezifizierungen und Definitionen der Risikodimensionen innerhalb der HARA für Halteorte.

Hinsichtlich der Kontrollierbarkeit bestehen insbesondere im Kontext des Sichtweitenmodells Verbesserungspotenziale, die erläuterten Modellannahmen zu reduzieren und eine größere Detailtiefe hinsichtlich verwendeter Parameter zu erreichen. Zudem besteht das Problem, dass die berechneten Kontrollierbarkeitsbereiche durch Variation der Weglänge l identifiziert wurden, was zwar zum gewünschten Ergebnis führte, jedoch mit erhöhtem Aufwand verbunden war. Durch Entwicklung eines Optimierungsansatzes besteht die Möglichkeit, den Berechnungsaufwand zu reduzieren. Ein weiteres Problem bezüglich des Sichtweitenmodells besteht hinsichtlich der Verwendung benötigter Daten zu Kurvenradien und Kurvenwinkeln bzw. Kurvenlängen. Im Anwendungsteil wurde dazu eine Näherung anhand von Satellitenbildern herangezogen, welche jedoch fehlerbehaftet ist. Im Realverkehr, d.h. innerhalb des Projekts UNICAR*agil* wird hochgenaues Kartenmaterial verwendet, sodass diese Daten eventuell zur Lösung dieses Problems beitragen. Nicht betrachtet wurden bei der Kontrollierbarkeit bspw. mögliche Wetter- und Sichtverhältnisse, sowie Kuppen, welche in Kombination mit den vorhandenen Szenarien und Gefährdungen den möglichen Ergebnisraum vergrößern und daher eine weitere Verbesserungsmöglichkeit bieten.

Hinsichtlich der Berechnung von Auftretenswahrscheinlichkeiten besteht das Potenzial, diese anhand von Verkehrsstatistiken genau zu bestimmen. Ist die durchschnittliche Verkehrsauslastung bestimmter Streckenabschnitte tageszeit- und wochentagabhängig bekannt, so besteht eine detaillierte Berechnungsgrundlage dafür, wie häufig bestimmte Szenarien oder Missionsgefährdungen innerhalb eines Streckenabschnitts auftreten.

Auch hinsichtlich der Schadensschwere von Missionsgefährdungen besteht die Möglichkeit, Statistiken zur Verkehrssituation innerhalb von Streckenabschnitten heranzuziehen, um daraus mögliche Zeitverzögerungen und/oder Umwege zu berechnen.

Die entwickelte Methodik bietet somit an einigen Stellen Verbesserungspotenziale. Jedoch bestehen auch Potenziale hinsichtlich anderer Anwendungen. Durch die Zuordnung bestimmter Risikolevel zu Halteorten innerhalb eines Streckenabschnitts besteht die Möglichkeit zur Durchführung eines Risikoabgleichs. Ist das Risiko des Zielortes bekannt (anhand der HARA für Halteorte) und kennt ein fahrerloses Fahrzeug seine Leistungsfähigkeit auf Grund der Selbstrepräsentation, so kann ein Abgleich durchgeführt werden zwischen dem Risiko zur Erreichung eines Halteortes und dem Risiko des Halteortes selbst. Des Weiteren besteht die Möglichkeit einen Algorithmus zu entwickeln und im Fahrzeug zu implementieren, der es ermöglicht, im Fall einer Systemdegradation anhand der Merkmale eines Streckenabschnitts einen sicheren Halteort zu identifizieren. Im Prinzip entspricht dieser potenzielle Algorithmus dem Vorgehen im Abschnitt der Anwendung der entwickelten Methodik. Auf Grundlage der Merkmale eines Streckenabschnitts werden gemäß dem Katalog der gefährlichen Szenarien und Missionsgefährdungen alle auf diesen Abschnitt anwendbaren Szenarien und Gefährdungen identifiziert und dann für einen bestimmten Halteort das höchste Risikolevel als Gesamtrisiko festgelegt. Daraus wird dann derjenige Ort ausgewählt, welcher sicher ist und gemäß dem erwähnten Risikoabgleich das geringste Gesamtrisiko aufweist.

Zusammenfassend bietet die vorliegende Arbeit eine geeignete Methodik zur Identifikation sicherer Orte für Nothaltemanöver fahrerloser Fahrzeuge. Die Tauglichkeit wurde anhand der Anwendung auf eine Referenzstrecke bestätigt, sodass die eingangs erwähnten Ziele erreicht wurden. Die beschriebenen Potenziale dienen zudem als Grundlage für weitere Forschungen.

Anhang

1. Anhänge der Fehlerbaumanalysen

Nachfolgend werden die drei Fehlerbäume (Anhang 1 bis Anhang 3) der Fehlerbaumanalysen aus Kapitel 3.1.2 dargestellt, welche ausgehend von den einzelnen unerwünschten Folgen *unmittelbarer Personenschaden*, *mittelbarer Personenschaden* und *Missionsgefährdung* als Ergebnis die resultierenden Ursachen aufzeigen. Auf Grund der Übersichtlichkeit wurde im Textteil der Thesis auf die grafische Darstellung verzichtet.

Die Ausrichtung der Bäume erfolgt auf Grund von Platzverhältnissen von links nach rechts, anstatt üblicherweise von oben nach unten. Die unerwünschte Folge befindet sich also auf der linken Seite und die resultierenden Ursachen rechts davon, wobei jede tiefere Ebene weiter nach rechts eingerückt wird.

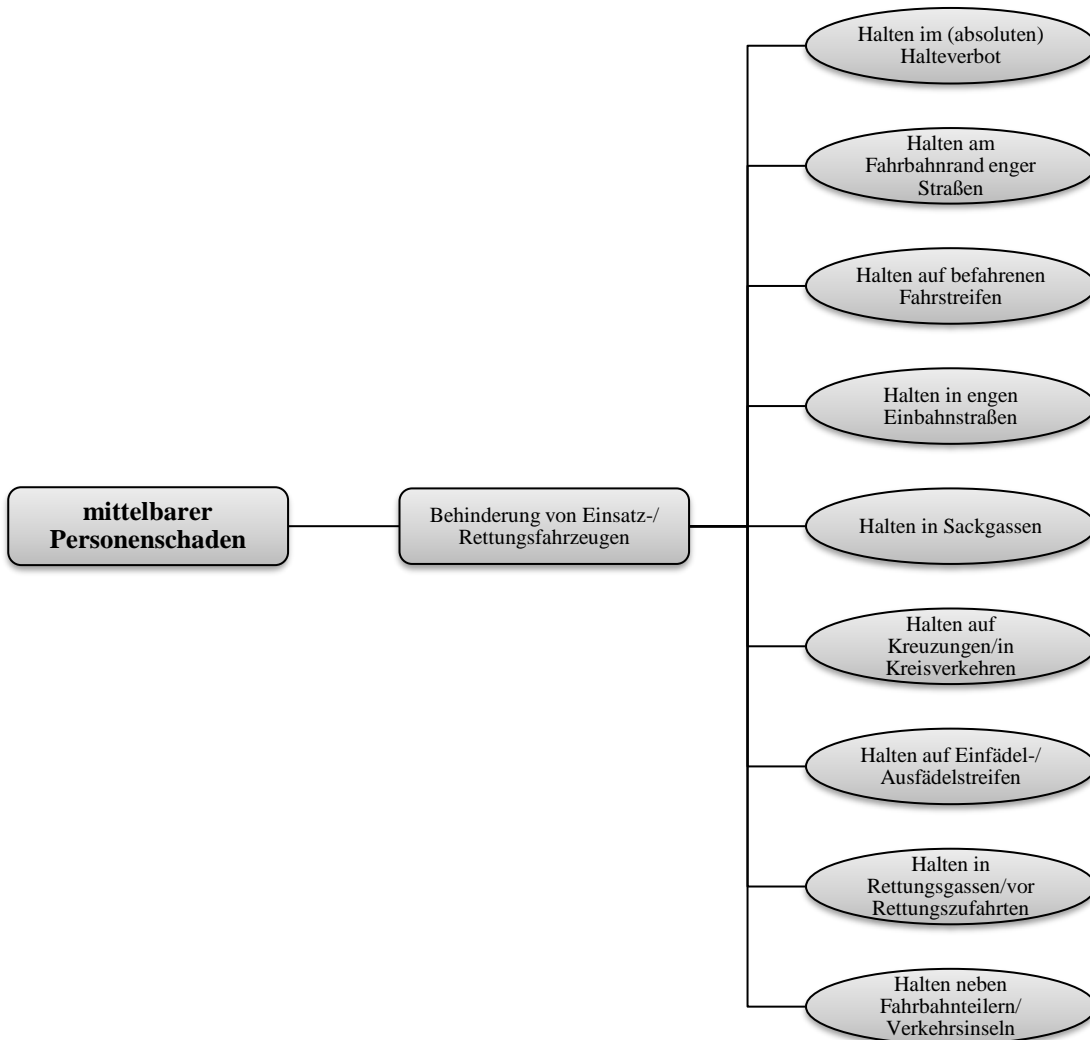
Anhang 1 stellt auf der nachfolgenden Seite den Fehlerbaum für die unerwünschte Folge *unmittelbarer Personenschaden* dar.

Anhang 1: Fehlerbaum der unerwünschten Folge *unmittelbarer Personenschaden*



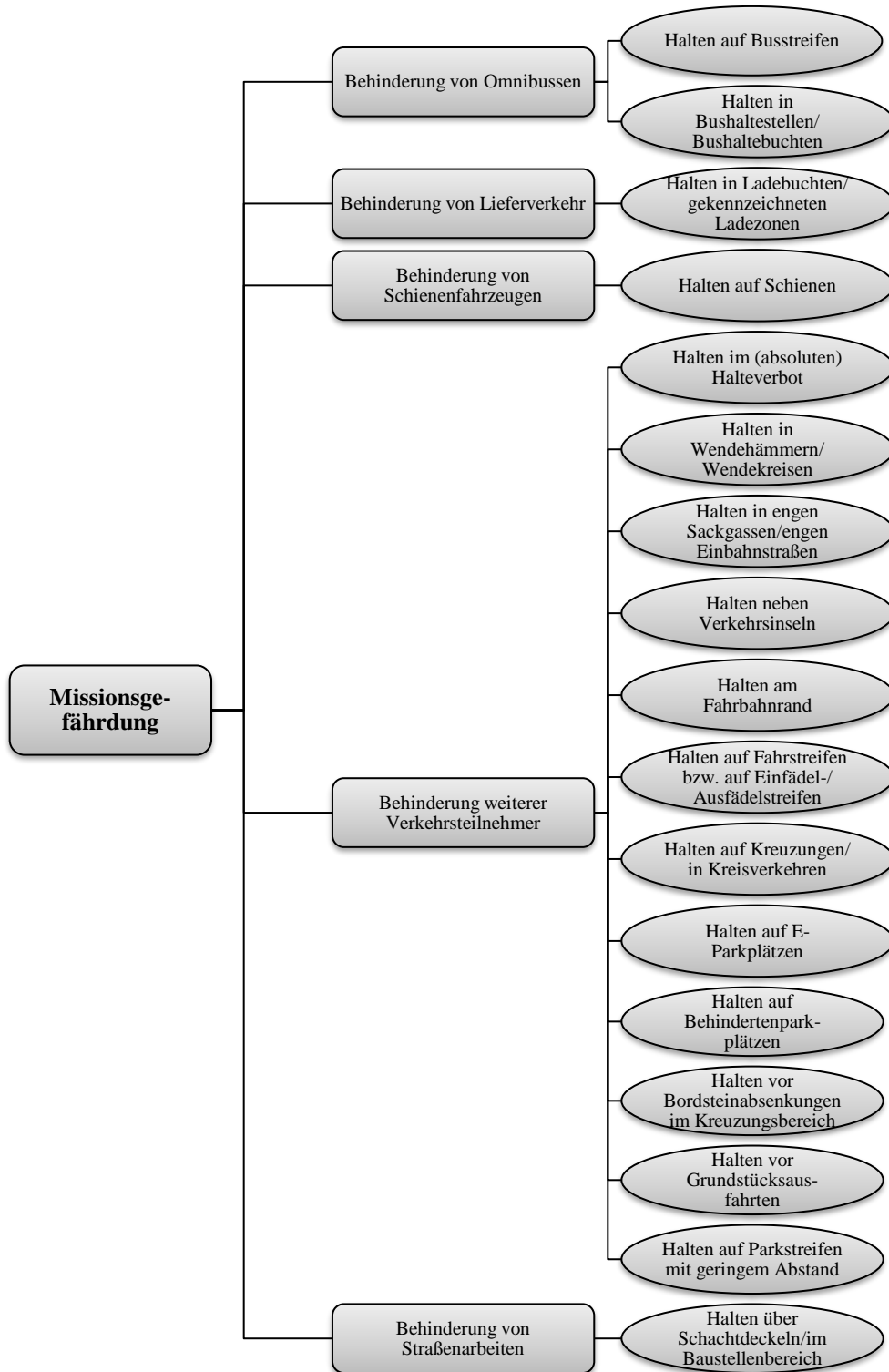
Anhang 2 stellt nachfolgend den Fehlerbaum für die unerwünschte Folge *mittelbarer Personenschäden* dar.

Anhang 2: Fehlerbaum der unerwünschten Folge *mittelbarer Personenschäden*



Anhang 3 stellt nachfolgend den Fehlerbaum für die unerwünschte Folge *Missionsgefährdung* dar.

Anhang 3: Fehlerbaum der unerwünschten Folge *Missionsgefährdung*



2. Anhänge zu den Ergebnissen der HARA für Halteorte

Im nachfolgenden Teil des Anhangs werden die Ergebnisse der durchgeführten zweigeteilten HARA zur Identifikation sicherer Halteorte dargestellt.

Die erste Tabelle stellt in Anhang 4 die identifizierten und potenziell gefährlichen Szenarien durch Wahl eines bestimmten Halteortes dar. Diese wurden innerhalb der vier Kategorien *Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug*, *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug*, *Verlassen des Egofahrzeugs* und *Sichtbarkeit des Egofahrzeugs* hinsichtlich der drei Risikodimensionen *Kontrollierbarkeit*, *Auftretenswahrscheinlichkeit* und *Schadensschwere* bewertet. Anschließend wurde ein Risikostufelevel zugeordnet, welches dazu dient, eine Aussage über die Sicherheit des entsprechenden Halteortes zu treffen.

Anhang 4: Ergebnisse der HARA hinsichtlich gefährlicher Szenarien im Kontext sicherer Halteorte

Potenziell gefährliches Szenario	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	RL
1. Eine Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben...							
auf Parkplätzen, führt zu einer <u>Kollision zwischen Fahrzeugen</u> , da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (1)	K0	Verkehrsteilnehmer wissen, dass auf einem Parkplatz stehende Autos die Sicht einschränken können und passen ihr Fahrverhalten entsprechend an. Die Relativgeschwindigkeit ist sehr gering. (§3 Abs. 1 Satz 2 StVO-Erläuterung: Auf belebten Parkplätzen ist eine vorsichtige Fahrweise geboten)	A4	Parkplätze werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S0	Die Relativgeschwindigkeit auf Parkplätzen ist sehr gering. Eine Kollision zwischen Fahrzeugen ruft i.d.R. keine Verletzungen hervor.	-
auf Parkplätzen, führt zu einer <u>Kollision zwischen Fahrzeugen und Fußgängern</u> , da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (2)	K0	Verkehrsteilnehmer wissen, dass auf einem Parkplatz stehende Autos die Sicht einschränken können und passen ihr Fahrverhalten entsprechend an. Fußgänger auf Parkplätzen beachten den Verkehr aufmerksam. Die Relativgeschwindigkeit ist sehr gering. (§3 Abs. 1 Satz 2 StVO-Erläuterung: Auf belebten Parkplätzen ist eine vorsichtige Fahrweise geboten)	A4	Parkplätze werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S1	Bei Kollision mit einem Fußgänger können sehr geringe Aufprallgeschwindigkeiten leichte/mittlere Verletzungen hervorrufen.	-
auf Parkstreifen/in Haltebuchten, führt zu einer <u>Kollision zwischen Fahrzeugen</u> , da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (3)	K0	Verkehrsteilnehmer wissen, dass auf einem Parkstreifen stehende Autos die Sicht einschränken können und passen ihr Fahrverhalten entsprechend an.	A4	Straßen mit Parkstreifen werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S2	Die Relativgeschwindigkeit ist bei Vorbeifahrt an Parkstreifen entsprechend der Geschwindigkeitszone normalerweise höher als auf Parkplätzen. Eine Heck-/ Frontalkollision mit einem weiteren Fahrzeug und geringer Aufprallgeschwindigkeit kann ernste/lebensgefährliche Verletzungen hervorrufen.	-
auf Parkstreifen/in Haltebuchten, führt zu einer <u>Kollision zwischen Fahrzeugen und Fußgängern</u> , da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (4)	K0	Verkehrsteilnehmer wissen, dass auf einem Parkstreifen stehende Autos die Sicht einschränken können und passen ihr Fahrverhalten entsprechend an. Fußgänger beachten den Verkehr aufmerksam, beispielsweise beim Wechsel auf die andere Straßenseite, wenn sie vor dem parkenden Egofahrzeug hervortreten.	A4	Straßen mit Parkstreifen werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S2	Die Relativgeschwindigkeit ist bei Vorbeifahrt an Parkstreifen entsprechend der Geschwindigkeitszone normalerweise höher als auf Parkplätzen. Bei Kollision mit einem Fußgänger können geringe Aufprallgeschwindigkeiten leichte/mittlere Verletzungen hervorrufen.	-
in zweiter Reihe neben Parkstreifen (bei mehreren Fahrstreifen), führt zu einer <u>Kollision zwischen Fahrzeugen</u> , da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (5)	K0-K2	Sichteinschränkungen ist abhängig vom Fahrbahntyp. Die Einstufung der Kontrollierbarkeit erfolgt analog zu (6), (7), (8), (9).	A4	Straßen mit Parkstreifen werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S2-S3	Die Relativgeschwindigkeit ist abhängig vom Fahrbahntyp. Die Einstufung der Schadensschwere erfolgt analog zu (6), (7), (8), (9).	kein RL bis RL C
am Fahrbahnrand/auf dem rechten Fahrstreifen von Straßen (keine Kreuzungsbereiche, <u>breit ausgebaut/mehrere Fahrstreifen in eine Richtung, gerade</u>), führt zu einer Kollision, da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (6)	K0	Auf Grund von kaum vorhandenen Sichteinschränkungen durch das Egofahrzeug auf übersichtlichen und gut ausgebauten Straßen sind andere Verkehrsteilnehmer in der Lage, die Verkehrssituation zu überblicken und das Egofahrzeug gefahrlos zu passieren.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S3	Die Relativgeschwindigkeiten sind auf gut ausgebauten Straßen generell höher. Eine Heck-/ Frontalkollision mit einem anderen Fahrzeug und mittlerer Geschwindigkeit kann lebensbedrohliche bis fatale Verletzungen hervorrufen.	-

Potenziell gefährliches Szenario	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	RL
1. Eine Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben...							
am Fahrbahnrand/auf dem rechten Fahrstreifen von Straßen (keine Kreuzungsbereiche, <u>schmal ausgebaut/ein Fahrstreifen in eine Richtung, gerade</u>), führt zu einer Kollision, da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (7)	K1	Auf Grund von kaum vorhandenen Sichteinschränkungen durch das Egofahrzeug auf übersichtlichen jedoch schmalen Straßen sind andere Verkehrsteilnehmer in der Lage, die Verkehrssituation zu überblicken, jedoch ist das Passieren des Egofahrzeugs nur erschwert möglich, da der Fahrstreifen des Gegenverkehrs genutzt werden muss.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S2	Die Relativgeschwindigkeiten sind auf schmal ausgebauten Straßen generell niedriger. Eine Heck-/ Frontalkollision mit einem weiteren Fahrzeug und geringer Aufprallgeschwindigkeit kann ernste/lebensgefährliche Verletzungen hervorrufen.	A
am Fahrbahnrand/auf dem rechten Fahrstreifen von Straßen (keine Kreuzungsbereiche, <u>breit ausgebaut/mehrere Fahrstreifen in eine Richtung, kurvenreich</u>), führt zu einer Kollision, da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (8)	K1	Auf Grund von Sichteinschränkungen durch das Egofahrzeug auf gut ausgebauten jedoch unübersichtlichen Straßen sind andere Verkehrsteilnehmer erschwert in der Lage, die Verkehrssituation zu überblicken, jedoch ist das Passieren des Egofahrzeugs gut kontrollierbar, da ausreichend Platz zur Verfügung steht.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S3	Die Relativgeschwindigkeiten sind auf gut ausgebauten Straßen generell höher. Eine Heck-/ Frontalkollision mit einem anderen Fahrzeug und mittlerer Geschwindigkeit kann lebensbedrohliche bis fatale Verletzungen hervorrufen.	B
am Fahrbahnrand/auf dem rechten von Straßen (keine Kreuzungsbereiche, <u>schmal ausgebaut/ein Fahrstreifen in eine Richtung, kurvenreich</u>), führt zu einer Kollision, da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (9)	K2	Auf Grund von Sichteinschränkungen durch das Egofahrzeug auf schmalen und teilweise unübersichtlichen Straßen sind andere Verkehrsteilnehmer erschwert in der Lage, die Verkehrssituation zu überblicken und gefahrlos das Egofahrzeug zu passieren.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S2	Die Relativgeschwindigkeiten sind auf schmal ausgebauten Straßen generell niedriger. Eine Heck-/ Frontalkollision mit einem weiteren Fahrzeug und geringer Aufprallgeschwindigkeit kann ernste/lebensgefährliche Verletzungen hervorrufen.	B
vor/auf Fußgängerüberwegen (im Kreuzungsbereich), führt zu einer Kollision mit Fußgängern, da diese beim Überqueren der Straße von anderen Verkehrsteilnehmern zu spät wahrgenommen werden. (10)	K2	Auf Grund von starken Sichteinschränkungen durch das Egofahrzeug vor/auf Fußgängerüberwegen (im Kreuzungsbereich) sind andere Verkehrsteilnehmer erschwert in der Lage, die Verkehrssituation zu überblicken, insbesondere dann, wenn das Hinweisschild eines Fußgängerüberweges verdeckt wird. Die Sichteinschränkung führt jedoch zu einer Geschwindigkeitsreduktion, um möglichst eine Kollision zu vermeiden.	A4	Fußgängerüberwege werden sehr häufig in Städten genutzt, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass Fußgänger zu spät von anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen werden.	S2	Bei Annäherung an Kreuzungsbereiche wird die Relativgeschwindigkeit verringert. Bei Kollision mit einem Fußgänger können geringe Aufprallgeschwindigkeiten leichte/mittlere Verletzungen hervorrufen.	B
im Kreuzungs-/ Einmündungsbereich (Anwendung des § 12 Abs. 3 Nr. 1 StVO), d.h. in einem Abstand von 5 m vor und hinter den Schnittpunkten der Fahrbahnkannten, führt zu einer Kollision, da andere Verkehrsteilnehmer beim Überqueren der Kreuzung oder Einfädeln in den Querverkehr diesen zu spät wahrnehmen. (11)	K2	Auf Grund von starker Sichteinschränkung durch das Egofahrzeug vor Kreuzungen/Einmündungen sind andere Verkehrsteilnehmer erschwert in der Lage, die Verkehrssituation zu überblicken. Die Sichteinschränkung führt jedoch zu einer Geschwindigkeitsreduktion, um möglichst eine Kollision zu vermeiden.	A4	Kreuzungen werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass der Querverkehr zu spät von anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen werden.	S3	Der Querverkehr, dessen Sicht nicht eingeschränkt ist, fährt normalerweise mit unveränderter Geschwindigkeit. Eine Kollision mit einem weiteren Fahrzeug und mittlerer Aufprallgeschwindigkeit kann lebensgefährliche/fatale Verletzungen hervorrufen.	C
auf Rechtsabbiegerfahrstreifen im Kreuzungsbereich und zugleich vor Radwegen, die neben der Fahrbahn verlaufen, führt zu einer Kollision mit Radfahrern oder E-Scooter-Fahrern, da diese zu spät von abbiegenden Verkehrsteilnehmern wahrgenommen werden. (12)	K2	Auf Grund von starken Sichteinschränkungen durch das Egofahrzeug vor Radwegen im Kreuzungsbereich sind andere Verkehrsteilnehmer erschwert in der Lage, die Verkehrssituation zu überblicken. Die Sichteinschränkung führt jedoch zu einer Geschwindigkeitsreduktion, um möglichst eine Kollision zu vermeiden.	A4	Radfahrer oder E-Scooter-Fahrer sind in Städten sehr wahrscheinlich auf Radwegen anzutreffen, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass diese zu spät von anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen werden.	S2	Bei Annäherung an Radwege im Kreuzungsbereich wird die Relativgeschwindigkeit verringert. Bei Kollision mit einem Radfahrer/E-Scooter-Fahrer können geringe Aufprallgeschwindigkeiten leichte/mittlere Verletzungen hervorrufen.	B
2. Eine Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben...							
auf Radwegen/Fußwegen/Fußgängerüberwegen, führt zu einer potenziellen Kollision, wenn Radfahrer/Fußgänger/E-Scooter auf die Fahrbahn ausweichen müssen, da der Platz nicht ausreicht, um das Egofahrzeug zu passieren. (13)	K3	Radfahrer und Fußgänger oder auch Rollstuhlfahrer und ältere Menschen sind erschwert in der Lage das Egofahrzeug zu passieren, insbesondere bei schnellem Verkehrsfluss.	A4	Fußgänger und Radfahrer sind in Städten sehr wahrscheinlich auf Radwegen/Fußwegen/Fußgängerüberwegen anzutreffen, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass diese auf die Fahrbahn ausweichen müssen.	S3	Bei Kollision mit einem Fußgänger/Radfahrer/E-Scooter-Fahrer können mittlere Aufprallgeschwindigkeiten lebensgefährliche/fatale Verletzungen hervorrufen.	D
z.T. auf Fußgänger-/Radwegen, sodass diese jedoch nicht auf die Fahrbahn ausweichen müssen und z.T. auf einem aktiven, ausreichend breiten Fahrstreifen, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden, insbesondere dann, wenn sich ein Stau bildet, da eine Vorbeifahrt erschwert möglich ist. (14)	K1	Das Egofahrzeug befindet sich nur zum Teil auf dem Fuß-/Radweg, sodass Fußgänger und Radfahrer unter Beachtung der verringerten Fahrbahnbreite das Egofahrzeug zu passieren. Die Sichteinschränkungen sind gering, da sich nur ein Teil des Egofahrzeugs auf dem Fahrstreifen befindet.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	QM

Potenziell gefährliches Szenario	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	RL
2. Eine Behinderung/Blokkade durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben...							
im absoluten Halteverbot, führt zu einem Verkehrsrückstau und damit zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden. (15)	K3	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nur erschwert/nicht passieren, da harte laterale Begrenzungen, die Verkehrslage und das stehende Egofahrzeug den verfügbaren Raum einschränken. Die Umgehung eines Staus ist ggf. unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege möglich.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	A
in zweiter Reihe neben Parkstreifen (auf engen einstreifigen Straßen), führt einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden. (16)	K3	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nicht passieren. Die Umgehung eines Staus ist ggf. unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege möglich.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	A
in Haltebuchten/auf Parkplätzen/auf Parkstreifen, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden. (17)	K0	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug ohne Probleme passieren.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	-
in Haltestellenbuchten/an Bushaltestellen, führt zu einem gefährlichen Szenario, da Omnibusse in zweiter Reihe bzw. auf aktiven Fahrstreifen halten müssen, um Fahrgästen das Ein-/ Aussteigen zu ermöglichen. (18)	K1	Fahrgäste können den Omnibus unter Beachtung sich nähernder Radfahrer in Richtung der Haltestelle verlassen. Durch weitere Fahrzeuge besteht keine Gefahr, da diese auf der abgewandten Seite des Ausstiegs vorbeifahren.	A4	Haltestellen werden in Städten hoch frequentiert von Omnibussen angesteuert, sodass es sehr wahrscheinlich ist, dass Omnibusse behindert werden. Zudem sind Radfahrer in Städten häufig anzutreffen, sodass es häufig zu der Situation kommen kann, dass aussteigende Insassen Radfahrer beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen.	S1	Kollisionen zwischen Radfahrern und Fußgängern sind auf Grund der geringen Massen/geringen kinetischen Energien weitaus ungefährlicher als zwischen Pkw/Lkw und Fußgängern. Eine Kollision kann leichte/mittlere Verletzungen hervorrufen.	QM
am rechten Fahrstreifenrand/auf aktiven Fahrstreifen einer Fahrbahn mit mehreren Fahrstreifen in Fahrtrichtung, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden. (19)	K0	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug unter Nutzung der anderen Fahrstreifen passieren.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	-
am Fahrbahnrand einer Fahrbahn mit nur einem breiten Fahrstreifen in Fahrtrichtung, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden. (20)	K1	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug unter Nutzung des eigenen Fahrstreifens (und wenn notwendig z.T. der Gegenfahrbahn) passieren. Entgegenkommende Verkehrsteilnehmer werden durch Blaulicht/Martinshorn frühzeitig gewarnt.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	QM
am Fahrbahnrand einer Fahrbahn mit nur einem schmalen Fahrstreifen in Fahrtrichtung/auf aktiven einstreifigen Fahrstreifen in Fahrtrichtung, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden und die Fahrzeuge in den Gegenverkehr ausweichen müssen. (21)	K2	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nur unter Nutzung der Gegenfahrbahn passieren. Der Gegenverkehr muss beobachtet und ggf. sogar abgewartet werden.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	QM
auf Einfädel-/Ausfädelstreifen von Fahrbahnen, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden, insbesondere dann, wenn sich ein Stau bildet, da eine Vorbeifahrt erschwert/nicht möglich ist. (22)	K3	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nur erschwert/nicht passieren. Die Umgehung eines Staus ist ggf. unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege möglich.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	A
in Kreisverkehren, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden, insbesondere dann, wenn sich ein Stau bildet, da eine Vorbeifahrt erschwert/nicht möglich ist. (23)	K3	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nur erschwert/nicht passieren, da harte laterale Begrenzungen, die Verkehrslage und das stehende Egofahrzeug den verfügbaren Raum einschränken. Die Umgehung eines Staus ist ggf. unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege möglich.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	A
vor Kreuzungen mit nur einem Fahrstreifen zur Geradeausfahrt und Rechtsabbiegen, sowie ggf. mit einem Linksabbiegerstreifen, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden. (24)	K3	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nur erschwert/nicht passieren, da harte laterale Begrenzungen, die Verkehrslage und das stehende Egofahrzeug den verfügbaren Raum einschränken. Die Umgehung eines Staus ist ggf. unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege möglich.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	A

Potenziell gefährliches Szenario	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	RL
2. Eine Behinderung/Blokkade durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben...							
in engen einstreifigen Straßen (ein Fahrstreifen für beide Richtungen oder Einbahnstraßen, einstreifige Tunnel/Unterführungen, einstreifige Brücken/Überführungen) mit harten lateralen Begrenzungen, führt dazu, dass Rettungsfahrzeuge das Egofahrzeug nicht passieren können. (25)	K3	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nicht passieren. Es muss durch Nutzung anderer Verkehrswege unter Zeitverzögerung umfahren werden. Ein notwendiges Zurücksetzen innerhalb einer Einbahnstraße verstößt zudem gegen Verkehrsregeln und erschwert die Rettungsfahrt.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	A
in Sackgassen, führt zu einem gefährlichen Szenario, da potenzielle Einsatz-/ Rettungsfahrten behindert werden, das angestrebte Ziel zu erreichen. (26)	K3	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nicht passieren. Die Wahl einer alternativen Verkehrsrouten entfällt bei Sackgassen.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	A
im Bereich von Verkehrsinseln, führt dazu, dass Rettungsfahrzeuge in den Gegenverkehr ausweichen müssen, um das Egofahrzeug zu passieren. (27)	K2	Rettungsfahrzeuge können das Egofahrzeug nur unter Nutzung der Gegenfahrbahn passieren. Gegenverkehr muss abgewartet und beachtet werden.	A1	Einsatz-/ Rettungsfahrten kommen in Städten selten vor, sodass es selten zur Behinderung dieser kommen kann.	S3	Bei Einsatz-/ Rettungsfahrten können Sekunden von Zeitverzögerungen lebensgefährliche/fatale Folgen für Verletzte oder in Not geratene Personen haben.	QM
3. Beim Verlassen des Egofahrzeugs...							
auf einem Parkplatz kommt es zu einer Kollision zwischen aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs und anderen Fahrzeugen, da die Wahrnehmung nicht rechtzeitig erfolgt. (28)	K0	Auf Parkplätzen herrscht eine sehr geringe Relativgeschwindigkeit. Insassen beachten beim Aussteigen den Verkehr und sind in der Lage, die Verkehrssituation einzuschätzen. Umgekehrt werden Fußgänger von Fahrern anderer Fahrzeuge ständig beachtet.	A4	Parkplätze werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass ein rechtzeitiges Anhalten anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist.	S1	Bei Kollision mit einem Fußgänger können sehr geringe Aufprallgeschwindigkeiten leichte/mittlere Verletzungen hervorrufen.	-
in einem Verkehrsstau mit Stop-and-Go-Phasen kommt es zu einer Kollision zwischen aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs und anderen Fahrzeugen, da die Wahrnehmung nicht rechtzeitig erfolgt. (29)	K0	Die Relativgeschwindigkeit ist gering bis sehr gering. Insassen nutzen Phasen geringer Geschwindigkeiten zum Verlassen des Egofahrzeugs und beachten den Verkehr. Umgekehrt werden Fußgänger von Fahrern anderer Fahrzeuge beachtet.	A4	Staus kommen insbesondere im Berufsverkehr häufig vor, sodass es häufig zu der Situation kommen kann, dass die aussteigenden Insassen andere Verkehrsteilnehmer beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen.	S2	Bei Kollision mit einem Fußgänger können geringe Aufprallgeschwindigkeiten ernste/lebensgefährliche Verletzungen hervorrufen.	-
in einem verkehrsberuhigten Bereich in Fahrtrichtung links (auf Grund harter lateraler Begrenzungen) kommt es zu einer Kollision zwischen aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs und anderen Fahrzeugen, da die Wahrnehmung nicht rechtzeitig erfolgt. (30)	K0	Trotz der vorgeschriebenen Geschwindigkeit von 7 km/h sind Fahrzeuge in verkehrsberuhigten Bereichen häufig schneller unterwegs. Insassen beachten beim Aussteigen den Verkehr und sind in der Lage die Verkehrssituation einzuschätzen. Umgekehrt werden Fußgänger von Fahrern anderer Fahrzeuge ständig beachtet.	A2	In verkehrsberuhigten Bereichen ist das Verkehrsaufkommen gering, sodass es selten zu der Situation kommen kann, dass die aussteigenden Insassen andere Verkehrsteilnehmer beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen. Der Vorgang des Aussteigens ist innerhalb weniger Sekunden abgeschlossen.	S2	Bei Kollision mit einem Fußgänger können geringe Aufprallgeschwindigkeiten ernste/lebensgefährliche Verletzungen hervorrufen.	-
am rechten Fahrstreifenrand (ohne Radweg oder Seitenstreifen) kommt es zu einer Kollision zwischen aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs und anderen Verkehrsteilnehmern, da die Wahrnehmung nicht rechtzeitig erfolgt. (31)	K0	Beim Aussteigen am rechten Fahrbahnrand befinden sich die Personen außerhalb des Verkehrsgeschehens. Die ausgestiegenen Fahrgäste betreten nicht unachtsam die Fahrbahn. Andere Verkehrsteilnehmer kommen nicht von der Fahrbahn ab und beachten die ausgestiegenen Personen.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass die ausgestiegenen Insassen von anderen Verkehrsteilnehmern beachtet werden müssen.	S3	Bei Kollision mit einem Fußgänger können mittlere Aufprallgeschwindigkeiten lebensgefährliche/fatale Verletzungen hervorrufen.	-
am rechten Fahrstreifenrand mit angrenzendem Fußweg/Radweg kommt es zu einer Kollision mit Radfahrern oder ähnlichen VT wie E-Scooter-fahrern, da zwischen aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs und den dort fahrenden VT die Wahrnehmung nicht rechtzeitig erfolgt. (32)	K1	Radfahrer/E-Scooter können sich im Vergleich zu den ausgestiegenen Insassen teilweise mit Relativgeschwindigkeiten >30 km/h bewegen. Dabei können Radfahrer/E-Scooter übersehen werden. Ebenso rechnen Radfahrer/E-Scooter-Fahrer nicht zwingend mit Personen, die aus einem Fahrzeug auf den Radweg treten.	A4	Radfahrer/E-Scooter-Fahrer sind in Städten häufig anzutreffen, sodass es häufig zu der Situation kommen kann, dass aussteigende Insassen Radfahrer/E-Scooter-Fahrer beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen.	S1	Trotz Relativgeschwindigkeiten von teilweise >30 km/h sind Kollisionen zwischen Radfahrer/E-Scooter-Fahrern und Fußgängern auf Grund der geringen Massen/geringen kinetischen Energien weitaus ungefährlicher als zwischen Pkw/Lkw und Fußgängern. Eine Kollision kann leichte/mittlere Verletzungen hervorrufen.	QM
auf aktiven Fahrstreifen kommt es auf Grund zu später Wahrnehmung zwischen nachfolgenden Fahrzeugen und aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs zu einer Kollision, wenn das Egofahrzeug auf links liegenden Fahrstreifen anhält, obwohl mehrere Fahrstreifen in einer Richtung vorhanden sind und das Aussteigen nur im Verkehrsfluss möglich ist. (mittlere Geschwindigkeiten, 33)	K3	Beim Aussteigen im Verkehrsfluss sind die Insassen besonders vorsichtig und beachten den Verkehr aufmerksam. Andere Verkehrsteilnehmer hingegen rechnen nicht mit aussteigenden Personen. Die Relativgeschwindigkeiten können >50 km/h sein, was zu langen Anhaltewegen führt.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass die aussteigenden Insassen andere Verkehrsteilnehmer beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen.	S3	Bei Kollision mit einem Fußgänger können mittlere Aufprallgeschwindigkeiten lebensgefährliche/fatale Verletzungen hervorrufen.	D

Potenziell gefährliches Szenario	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	RL
3. Beim Verlassen des Egofahrzeugs...							
auf aktiven Fahrstreifen kommt es auf Grund zu später Wahrnehmung zwischen nachfolgenden Fahrzeugen und aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs zu einer Kollision, wenn das Egofahrzeug zwar <u>auf dem rechten Fahrstreifen anhält</u> , jedoch ein Aussteigen auf Grund baulicher Gegebenheiten/harter lateraler Begrenzungen nur im Verkehrsfluss möglich ist. (<u>mittlere Geschwindigkeiten, 34</u>)	K3	Beim Aussteigen im Verkehrsfluss sind die Insassen besonders vorsichtig und beachten den Verkehr aufmerksam. Andere Verkehrsteilnehmer hingegen rechnen nicht mit aussteigenden Personen. Die Relativgeschwindigkeiten können >50 km/h sein, was zu langen Anhaltewegen führt.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass die aussteigenden Insassen andere Verkehrsteilnehmer beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen.	S3	Bei Kollision mit einem Fußgänger können mittlere Aufprallgeschwindigkeiten lebensgefährliche/fatale Verletzungen hervorrufen.	D
auf aktiven Fahrstreifen kommt es auf Grund zu später Wahrnehmung zwischen nachfolgenden Fahrzeugen und aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs zu einer Kollision, wenn das Egofahrzeug <u>auf links liegenden Fahrstreifen anhält</u> , obwohl mehrere Fahrstreifen in einer Richtung vorhanden sind und das Aussteigen nur im Verkehrsfluss möglich ist. (<u>geringe Geschwindigkeiten, 35</u>)	K2	Beim Aussteigen auf Seite des Verkehrsflusses sind die Insassen besonders vorsichtig und beachten den Verkehr aufmerksam. Andere Verkehrsteilnehmer hingegen rechnen nicht mit aussteigenden Personen. Die Relativgeschwindigkeiten sind jedoch gering, was den Anhalteweg verringert.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass die aussteigenden Insassen andere Verkehrsteilnehmer beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen.	S2	Bei Kollision mit einem Fußgänger können geringe Aufprallgeschwindigkeiten ernste/lebensgefährliche Verletzungen hervorrufen.	B
auf aktiven Fahrstreifen kommt es auf Grund zu später Wahrnehmung zwischen nachfolgenden Fahrzeugen und aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs zu einer Kollision, wenn das Egofahrzeug zwar <u>auf dem rechten Fahrstreifen anhält</u> , jedoch ein Aussteigen auf Grund baulicher Gegebenheiten/harter lateraler Begrenzungen nur im Verkehrsfluss möglich ist. (<u>geringe Geschwindigkeiten, 36</u>)	K2	Beim Aussteigen auf Seite des Verkehrsflusses sind die Insassen besonders vorsichtig und beachten den Verkehr aufmerksam. Andere Verkehrsteilnehmer hingegen rechnen nicht mit aussteigenden Personen. Die Relativgeschwindigkeiten sind jedoch gering, was den Anhalteweg verringert.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass die aussteigenden Insassen andere Verkehrsteilnehmer beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen.	S2	Bei Kollision mit einem Fußgänger können geringe Aufprallgeschwindigkeiten ernste/lebensgefährliche Verletzungen hervorrufen.	B
in engen einstreifigen Straßen (ein Fahrstreifen für beide Richtungen oder Einbahnstraßen, einstreifige Tunnel/Unterführungen, einstreifige Brücken/Überführungen) mit harten lateralen Begrenzungen, kommt es zu einer Kollision zwischen aussteigenden Insassen des Egofahrzeugs und vorbeifahrenden Verkehrsteilnehmern (Radfahrer und einspurige KFZ), da die Wahrnehmung nicht rechtzeitig erfolgt. (<u>37</u>)	K1	Der Verkehr wird durch das stehende Egofahrzeug größtenteils blockiert wird. Die Insassen können das Fahrzeug unter Beachtung von Radfahrern und einspurigen KFZ verlassen, welche eventuell ausreichend Platz haben, das Egofahrzeug zu passieren.	A3	Radfahrer und einspurige KFZ sind in Städten häufig anzutreffen, sodass es häufig zu der Situation kommen kann, dass aussteigende Insassen Radfahrer und einspurige KFZ beachten müssen und umgekehrt von diesen beachtet werden müssen.	S2	Die Relativgeschwindigkeit eventuell vorbeifahrender Zweiräder ist auf Grund der eingeschränkten Fahrstreifenbreite gering. Bei Kollision mit einem Fußgänger können geringe Aufprallgeschwindigkeiten ernste/lebensgefährliche Verletzungen hervorrufen.	QM
4. Durch eingeschränkte Sichtbarkeit des Egofahrzeugs, durch Stehenbleiben...							
nach Unterführungen/Tunneln, kommt es zu einer Kollision, da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (<u>38</u>)	K0	Steht das Egofahrzeug an geeigneter Stelle und ist früh für andere Verkehrsteilnehmer erkennbar, ist ein rechtzeitiges Anhalten/Umfahren ohne Probleme möglich.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass das Egofahrzeug durch andere erkannt werden muss.	S1	Ein Abbremsen ist möglich, sodass die Relativgeschwindigkeit sehr gering ist. Eine Kollision kann leichte/mittlere Verletzungen hervorrufen (je nach Fahrzeug).	-
in unbeleuchteten Tunneln/Unterführungen, kommt es zu einer Kollision, da ein rechtzeitiges Anhalten für andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr möglich ist. (<u>39</u>)	K3	Bei plötzlichem Sichtbarwerden des Egofahrzeugs ist es schwierig ein Fahrmanöver auszuführen, das eine Kollision verhindert. Relativgeschwindigkeiten von ca. 50km/h sind wahrscheinlich.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass das Egofahrzeug durch andere erkannt werden muss.	S3	Ein Abbremsen ist kaum/nicht möglich. Eine Kollision mit einem weiteren Fahrzeug und mittlerer Aufprallgeschwindigkeit kann lebensgefährliche/fatale Verletzungen hervorrufen.	D
in Kurvenbereichen, kommt es zu einer Kollision, da dieses für nachfolgende Verkehrsteilnehmer zu spät sichtbar wird, um ein rechtzeitiges Anhaltenmanöver zur Kollisionsvermeidung durchzuführen. (<u>40</u>)	K0-K3	Die Kontrollierbarkeit wird in Abhängigkeit des Sichtweitenmodells für Kurven berechnet.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zu der Situation kommen kann, dass das Egofahrzeug durch andere erkannt werden muss.	S0-S3	Ein Abbremsen ist je nach Zeitpunkt des Sichtbarwerdens möglich. Im Falle einer K0-Einstufung ist kein Schaden zu erwarten und die Schadensschwere wird entsprechend mit S0 bewertet. Im Falle einer K3 Einstufung sind die zu erwartenden Aufprallgeschwindigkeiten vergleichsweise hoch. Ein Auffahrunfall mit einem weiteren Fahrzeug und mittlerer Aufprallgeschwindigkeit kann lebensgefährliche/fatale Verletzungen hervorrufen. Die Kategorie der Schadensschwere entspricht der Kategorie der Kontrollierbarkeit, da bei guter Kontrollierbarkeit ein Abbremsen möglich ist und somit die Aufprallgeschwindigkeiten und der mögliche Schaden verringert werden. Umgekehrt sind bei schlechter Kontrollierbarkeit die Aufprallgeschwindigkeiten und mögliche Schäden höher.	kein RL bis RL D

Die nachfolgende Tabelle in Anhang 5 stellt die identifizierten und potenziellen Missionsgefährdungen durch Wahl eines bestimmten Halteortes dar. Diese wurden innerhalb der Kategorie *Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug* hinsichtlich der drei Risikodimensionen *Kontrollierbarkeit*, *Auftretenswahrscheinlichkeit* und *Schadensschwere* bewertet. Anschließend wurde ein Risikolevel zugeordnet, welches dazu dient, eine Aussage über die Sicherheit bzw. Eignung des entsprechenden Halteortes zu treffen.

Anhang 5: Ergebnisse der HARA hinsichtlich Missionsgefährdungen im Kontext sicherer Halteorte

Potenzielle Missionsgefährdungen	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	RL
Eine Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben...							
im absoluten Halteverbot, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (1)	K3	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nur erschwert/nicht passieren, da harte laterale Begrenzungen, die Verkehrslage und das stehende Egofahrzeug den verfügbaren Raum einschränken. Die Umgehung eines Staus ist ggf. unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege möglich.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S2	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung und/oder Umwegen durchgeführt werden.	C
in zweiter Reihe neben Parkstreifen, mit ausreichend Abstand zum Vorbeifahren, führt ggf. zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (2)	K1	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug durch Nutzung anderer Fahrstreifen bzw. der Gegenfahrbahn und unter kurzer Zeitverzögerung passieren.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S1	Die Fahrmission wird durch kurze Zeitverzögerungen beeinträchtigt, kann jedoch nach Passieren des Egofahrzeugs wie geplant fortgesetzt werden.	QM
in zweiter Reihe neben Parkstreifen, ohne ausreichend Abstand zum Vorbeifahren, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (3)	K3	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nicht passieren. Das Missionsziel kann nur unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege erreicht werden.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S2	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung und/oder Umwegen durchgeführt werden.	C
an Stellen, wo die Nutzung gekennzeichnete Parkflächen verhindert wird, führt dazu, dass andere Verkehrsteilnehmer andere Parkmöglichkeiten aufsuchen müssen, um ihre Fahrmission zu beenden. (4)	K1	Verkehrsteilnehmer müssen unter Zeitverzögerung andere Parkmöglichkeiten aufsuchen.	A4	Parkplätze werden in Städten sehr häufig genutzt, sodass eine Behinderung bei der Parkplatzsuche sehr wahrscheinlich ist.	S1	Die Fahrmission wird durch Suche anderer Parkmöglichkeiten und kurze Zeitverzögerung beeinträchtigt.	QM
auf Parkplätzen/auf Parkstreifen, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (5)	K0	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug ohne Probleme passieren. In der Regel tritt keine Blockade auf, wenn ausgewiesene Parkplätze verwendet werden.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass ein Verkehrsstau bei Behinderung des Verkehrsweges sehr wahrscheinlich ist.	S0	Die Fahrmission wird nicht beeinträchtigt.	-
auf Omnibusstreifen, führt zu einer Gefährdung der Fahrmissionen öffentlicher Verkehrsmittel. (6)	K1	Omnibusse können das Egofahrzeug unter Nutzung anderer Fahrstreifen und unter Zeitverzögerung passieren.	A4	Busstreifen werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass eine Behinderung von Omnibussen sehr wahrscheinlich ist.	S1	Die Fahrmission wird durch kurze Zeitverzögerungen beeinträchtigt, kann jedoch nach Passieren des Egofahrzeugs wie geplant fortgesetzt werden.	QM
in Haltestellenbuchten/an Bushaltestellen, führt zu einer Gefährdung der Fahrmissionen öffentlicher Verkehrsmittel sowie weiterer Verkehrsteilnehmer durch Stillstand der Omnibusse auf aktiven Fahrstreifen. (7)	K1	Omnibusse können in zweiter Reihe bzw. auf einem Fahrstreifen halten, um Fahrgästen das Ein-/ Aussteigen zu ermöglichen. Der nachfolgende Verkehr muss entweder kurz warten oder darf mit Schrittgeschwindigkeit am stehenden Omnibus auf einem weiteren Fahrstreifen vorbeifahren.	A4	Haltestellen werden in Städten hoch frequentiert von Omnibussen angesteuert, sodass eine Behinderung dieser sowie des nachfolgenden Verkehrs sehr wahrscheinlich ist.	S1	Die Fahrmission wird nur durch kurze Zeitverzögerungen beeinträchtigt, da die Haltezeiten von Omnibussen gering sind.	QM
in Ladebuchten/Ladezonen, führt zu einer Gefährdung der Fahrmissionen des Lieferverkehrs. (8)	K3	Der Lieferverkehr kann je nach Transportgut seine Ladung nicht abladen oder keine neue Ladung aufnehmen.	A4	Ladebuchten werden regelmäßig zum Be-/Entladen verwendet, sodass eine Behinderung des Lieferverkehrs sehr wahrscheinlich ist.	S3	Die Fahr-/Liefermission kann nicht durchgeführt werden.	D
am rechten Fahrstreifenrand/auf aktiven Fahrstreifen einer Fahrbahn mit mehreren Fahrstreifen in Fahrtrichtung, führt ggf. zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern, da nachfolgende Fahrzeuge das Egofahrzeug unter Nutzung weiterer Fahrstreifen umfahren müssen. (9)	K1	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug durch Nutzung der anderen Fahrstreifen passieren.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S1	Die Fahrmission wird durch kurze Zeitverzögerungen beeinträchtigt, kann jedoch nach Passieren des Egofahrzeugs wie geplant fortgesetzt werden.	QM
am Fahrbahnrand einer Fahrbahn mit nur einem breiten Fahrstreifen in Fahrtrichtung, führt ggf. zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern, da nachfolgende Fahrzeuge das Egofahrzeug unter Nutzung der Gegenfahrbahn umfahren müssen. (10)	K1	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug durch Nutzung des eigenen (und wenn notwendig z.T. der Gegenfahrbahn) passieren.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S1	Die Fahrmission wird durch kurze Zeitverzögerungen beeinträchtigt, kann jedoch nach Passieren des Egofahrzeugs wie geplant fortgesetzt werden.	QM
am Fahrbahnrand einer Fahrbahn mit nur einem schmalen Fahrstreifen in Fahrtrichtung/auf aktiven einstreifigen Fahrstreifen in Fahrtrichtung, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (11)	K1	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug durch Nutzung der Gegenfahrbahn passieren, d.h. dieser muss ggf. abgewartet werden.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S2	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung durchgeführt werden.	A

Potenzielle Missionsgefährdungen	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	RL
Eine Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben...							
auf Einfädel-/Ausfädelstreifen von Fahrbahnen, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (12)	K2	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nur erschwert/nicht passieren. Die Umgehung eines Staus ist ggf. unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege möglich.	A4	Einfädel-/Ausfädelstreifen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S2	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung und/oder Umwegen durchgeführt werden.	B
in Kreisverkehren, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (13)	K2	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nur erschwert/nicht passieren. Die Umgehung eines Staus ist ggf. unter Zeitverzögerung durch Nutzung anderer Verkehrswege möglich.	A4	Kreisverkehre werden in Städten hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S2	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung und/oder Umwegen durchgeführt werden.	B
auf engen einstreifigen Straßen (nur ein Fahrstreifen für beide Richtungen, einstreifige Tunnel/Unterführungen, einstreifige Brücken/Überführungen) mit harten lateralen Begrenzungen, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (14)	K3	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nicht passieren, es muss durch Nutzung anderer Verkehrswege unter Zeitverzögerung umfahren werden.	A4	Einstreifige Straßen, Tunnel etc. werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S2	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung und/oder Umwegen durchgeführt werden.	C
in engen Einbahnstraßen mit harten lateralen Begrenzungen, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (15)	K3	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nicht passieren, es muss durch Nutzung anderer Verkehrswege unter Zeitverzögerung umfahren werden.	A4	Einbahnstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S3	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung und/oder Umwegen durchgeführt werden. Anwohner können ihre Häuser/Wohnungen nicht erreichen, wenn diese sich nach dem blockierenden Egofahrzeug befinden. Die Fahrmission kann dann nicht durchgeführt werden.	D
in engen Sackgassen, führt ggf. zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (16)	K3	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nicht passieren. Die Wahl einer alternativen Verkehrsrouten entfällt bei Sackgassen.	A4	Sackgassen werden bei einer angenommenen Haltezeit von einer Stunde ausreichend frequentiert befahren, sodass es in diesem Zeitraum zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommt, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S3	Die Fahrmission kann nicht durchgeführt werden.	D
im Bereich von Verkehrsinseln, führt zu einem Verkehrsrückstau und Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (17)	K1	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug durch Nutzung der Gegenfahrbahn passieren, d.h. dieser muss ggf. abgewartet werden.	A4	Stadtstraßen werden hoch frequentiert befahren, sodass es ständig zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommen kann, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S2	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung durchgeführt werden.	A
in einem Abstand von weniger als 50 cm zur Stoßstange eines weiteren Fahrzeugs, führt zu einer Gefährdung der Fahrmission dieses Verkehrsteilnehmers. (18)	K3	Wird ein Fahrzeug durch das abgestellte Egofahrzeug beim Parken eingeklemmt, so ist es für den eingeklemmten Verkehrsteilnehmer nicht möglich, seine beabsichtigte Fahrmission durchzuführen.	A4	Parkstreifen mit engen Parklücken kommen in Städten sehr häufig vor, sodass eine Behinderung bei Wahl dieses Halteortes sehr wahrscheinlich ist.	S3	Die Fahrmission kann nicht durchgeführt werden.	D
unmittelbar vor Grundstückseinfahrten/-ausfahrten bzw. gegenüber von Ausfahrten, wenn der zur Verfügung stehende Straßenraum nicht zum Aus- oder Einfahren ausreichen würde, führt zu einer Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (19)	K3	Verkehrsteilnehmer können das Egofahrzeug nicht passieren. Die Wahl einer alternativen Verkehrsrouten entfällt bei Grundstückseinfahrten/-ausfahrten.	A4	Grundstückseinfahrten/-ausfahrten werden in Städten, insbesondere bei Mehrfamilienhäusern, sehr häufig befahren, sodass eine Behinderung beim Ein-/Ausfahren sehr wahrscheinlich ist.	S3	Die Fahrmission kann nicht durchgeführt werden.	D
auf Behindertenparkplätzen, führt zu einer Gefährdung der (Fahr-)Mission von Verkehrsteilnehmern. (20)	K3	Menschen mit Behinderung sind zwar in der Lage andere Parkplätze aufzusuchen, als jene, die angesichts der körperlichen Umstände angemessen erscheinen, jedoch kann es dann zu erschwerten Erreichung ihres Endziels kommen, da die notwendige Strecke vom Fahrzeug zum Endziel länger ist. Bei nicht ausreichenden Platzverhältnissen ist ungehindertes Ein-/Aussteigen nicht möglich.	A4	Behindertenparkplätze werden in Städten häufig genutzt, sodass es sehr wahrscheinlich ist, dass bei entsprechender Wahl des Halteortes die beeinträchtigten Personen zusätzlich behindert werden.	S3	Behinderten Personen wird die Missionserreichung erschwert oder ist in Fällen mit nicht ausreichenden Platzverhältnissen nicht möglich.	D
auf Parkplätzen elektrisch betriebener Fahrzeuge, führt zu einer Gefährdung der (Fahr-)Mission von Verkehrsteilnehmern dieser Fahrzeuge. (21)	K2	Werden Parkplätze rein elektrisch betriebener Fahrzeuge blockiert, wird ihnen der Ladevorgang und damit das Erreichen der Fahrmission erschwert. Es muss, sofern Restreichweite vorhanden ist, ein anderer Parkplatz mit Lademöglichkeit unter Zeitverzögerung aufgesucht werden. Andernfalls müssen notwendige Maßnahmen (laden mit Verlängerungskabel) getroffen werden.	A4	Parkplätze elektrisch betriebener Fahrzeuge sind in Großstädten bereits häufig vorhanden und werden dementsprechend auch häufig verwendet, da es in eigenen Haushalten an Ladestationen fehlt.	S2	Die Fahrmission kann nur unter Zeitverzögerung und/oder unter Zuhilfenahme besonderer Maßnahmen durchgeführt werden.	B
auf Schachdeckeln und anderen Verschlüssen, sofern das Parken auf Gehwegen (durch Verkehrszeichen 315 oder Parkflächenmarkierung) erlaubt ist, führt zu einer Gefährdung der Missionsdurchführung notwendiger Arbeiten. (22)	K3	Steht ein Fahrzeug auf Schachdeckeln, so ist der Zugang zu diesen nicht möglich.	A3	Arbeiten an unterirdisch verlegten Leitungen/Rohren kommen an der gleichen Stelle unter konservativer Schätzung höchstens ein paar Mal pro Monat vor.	S3	Die Mission der Arbeiter/Handwerker kann nicht durchgeführt werden, solange sich das Egofahrzeug auf dem Schachdeckel befindet.	C
in Wendekreisen/Wendehämmern, führt zu einer Gefährdung der Fahrmission von Verkehrsteilnehmern. (23)	K2	Steht das Egofahrzeug im Bereich von Wendekreisen/Wendehämmern ist es für Pkw in der Regel möglich, dennoch die Richtung (unter mehrmaligem Vor- und Zurücksetzen) zu wechseln. Große Kfz wie Lkw müssen bei Behinderung in Wendekreisen/Wendehämmern jedoch zurücksetzen und können diese nicht befahren. In beiden Situationen ist mit Zeitverzögerungen zu rechnen.	A4	Wendekreise/Wendehämmern werden bei einer angenommenen Haltezeit von einer Stunde ausreichend frequentiert befahren, sodass es in diesem Zeitraum zur Behinderung durch das Egofahrzeug kommt, wodurch zusätzlich Staufahr besteht.	S1	Die Fahrmission wird durch kurze Zeitverzögerungen beeinträchtigt (erschwerter Wendevorgang), kann jedoch danach wie geplant fortgesetzt werden.	A

Potenzielle Missionsgefährdungen	K	K-Rational	A	A-Rational	S	S-Rational	RL
Eine Behinderung/Blockade durch das Egofahrzeug, durch Stehenbleiben...							
vor Bordsteinabsenkungen für Rollstuhlfahrer, führt zu einer Gefährdung der Fahrmission von Rollstuhlfahrern. (24)	K1	Rollstuhlfahrer können das Egofahrzeug durch Nutzung anderer Verkehrswege unter Zeitverzögerung passieren.	A3	Rollstuhlfahrer kommen in Städten häufig vor, jedoch ist nicht bei jedem Haltevorgang von einer Stunde mit einer Behinderung zu rechnen.	S1	Die Fahrmission wird durch kurze Zeitverzögerungen beeinträchtigt (Nutzung von kurzen Umwegen), kann jedoch danach wie geplant fortgesetzt werden.	QM

3. Anhänge des Sichtweitenmodells: Skizzen und Formelzusammenhänge

Im nachfolgenden Teil des Anhangs werden die Skizzen und Formelzusammenhänge des entwickelten Sichtweitenmodells dargestellt. Dazu werden, wie bereits im Kapitel 4.6.1 erwähnt, vier verschiedene Fälle betrachtet, wobei zu *Fall 0* keine spezifische Skizze dargestellt wird.

Die vollständigen Formelzeichen und Indizes sind Seite IV zu Beginn der Arbeit zu entnehmen. Die wichtigsten Formelzeichen bezüglich des Sichtweitenmodells werden jedoch auf Grund der Übersichtlichkeit in der folgenden Tabelle in Anhang 6 nochmals dargestellt.

Anhang 6: Tabellarische Übersicht der Formelzeichen des Sichtweitenmodells

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m	Abstand vom kurveninneren Fahrstreifenrand zum Sichthindernis
b	m	halbe Fahrstreifenbreite bzw. Abstand Augpunkt/Zielpunkt zum Fahrstreifenrand
c	m	Hilfsabstand
d	m	Hilfsabstand
l	m	zurückgelegte Kurvenlänge des Egofahrzeugs – Strecke zwischen Beginn der Kurvenkrümmung und Egofahrzeug
l_{ges}	m	gesamte Kurvenlänge – Strecke zwischen Beginn und Ende der Kurvenkrümmung
l_{rest}	m	restliche Kurvenlänge – Strecke zwischen Folgefahzeug und Ende der Kurvenkrümmung, zum Zeitpunkt des Sichtbarwerdens des Egofahrzeugs
R	m	Kurvenradius (zur kurveninneren Fahrstreifenmitte)
s_{erf}	m	erforderlicher Anhalteweg
s_{vor}	m	vorhandener Anhalteweg ab Sichtbarwerden des Egofahrzeugs
x_1	m	Weglänge des Folgefahrzeugs bis zur Kurve – Strecke zwischen nachfolgendem Fahrzeug und Beginn der Kurvenkrümmung
x_2	m	Weglänge des Egofahrzeugs nach der Kurve – Strecke zwischen Ende der Kurvenkrümmung und dem Egofahrzeug
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	°	Winkel innerhalb der Skizzen des Sichtweitenmodells
κ	°	Kurvenwinkel

Fall 0

Nachfolgend wird die Bedingung für *Fall 0* dargestellt, in welchem keine Sichteinschränkung durch ein Hindernis besteht. Das Egofahrzeug befindet sich in diesem Fall zwar innerhalb der Kurve, ist jedoch nur so weit in diese eingefahren, sodass der Sichtstrahl zwischen Aug- und Zielpunkt zwischen Folge- und Egofahrzeug nicht unterbrochen wird.

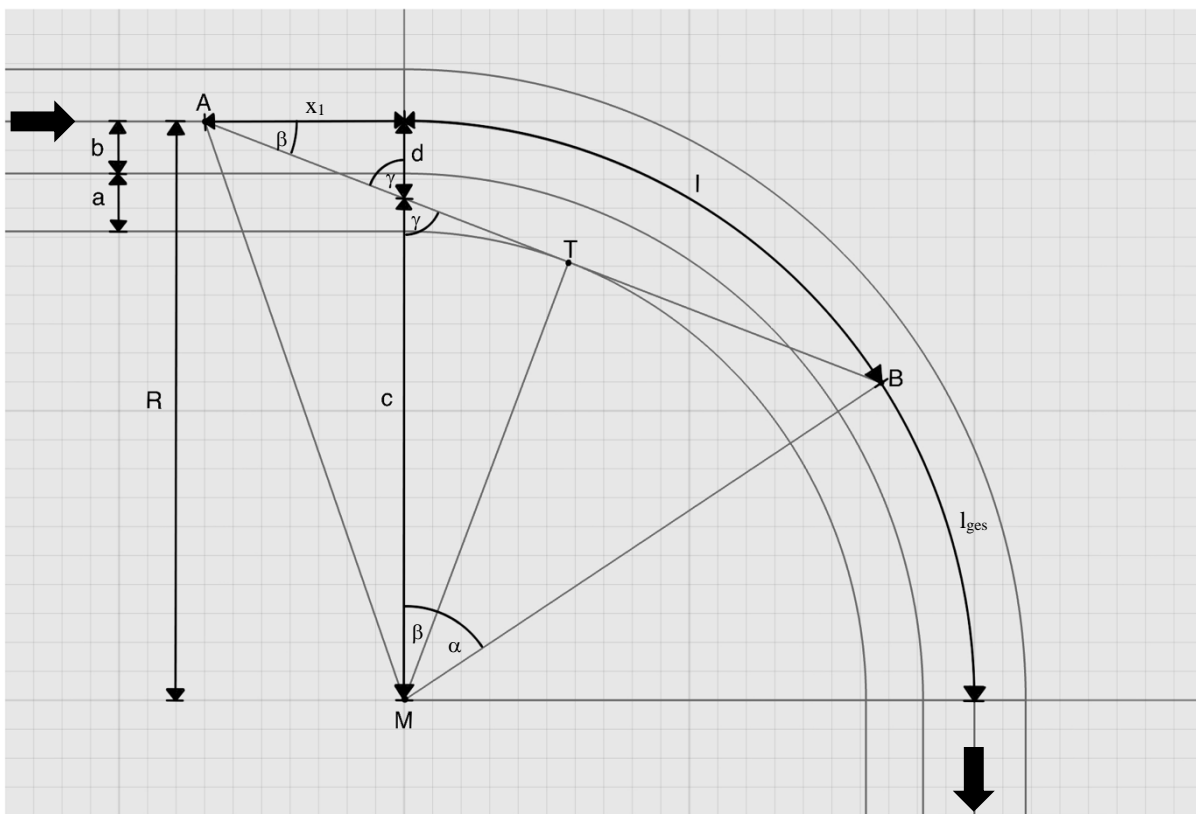
Bedingung:

$$l < \frac{2\pi R\alpha}{360}; \text{ mit } \alpha = \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)$$

Fall 1

Die nachfolgende Skizze in Anhang 7 stellt die geometrischen Beziehungen für *Fall 1* einer möglichen Sichteinschränkung im Kurvenbereich dar. Das Folgefahrzeug befindet sich außerhalb der Kurve ($x_1 > 0$) und das Egofahrzeug innerhalb der Kurve ($l > 0$ und $l < l_{\text{ges}}$).

Anhang 7: Skizze des Sichtweitenmodells für *Fall 1*



Bedingung:

$$\frac{2\pi R\alpha}{360} \leq l < \frac{4\pi R\alpha}{360} \text{ und } l < l_{\text{ges}} \text{ und } x_1 > 0; \text{ mit } \alpha = \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)$$

Formelzusammenhänge zur Bestimmung von s_{vor} :

$$l = 2\pi R \cdot \frac{\alpha + \beta}{360} \Rightarrow \beta = \frac{l \cdot 360}{2\pi R} - \alpha = \frac{l \cdot 360}{2\pi R} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)$$

$$\cos(\beta) = \frac{R-a-b}{c} \Rightarrow c = \frac{R-a-b}{\cos(\beta)} = \frac{R-a-b}{\cos\left(\frac{l \cdot 360}{2\pi R} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)\right)}$$

$$d = R - c = R - \frac{R-a-b}{\cos\left(\frac{l \cdot 360}{2\pi R} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)\right)}$$

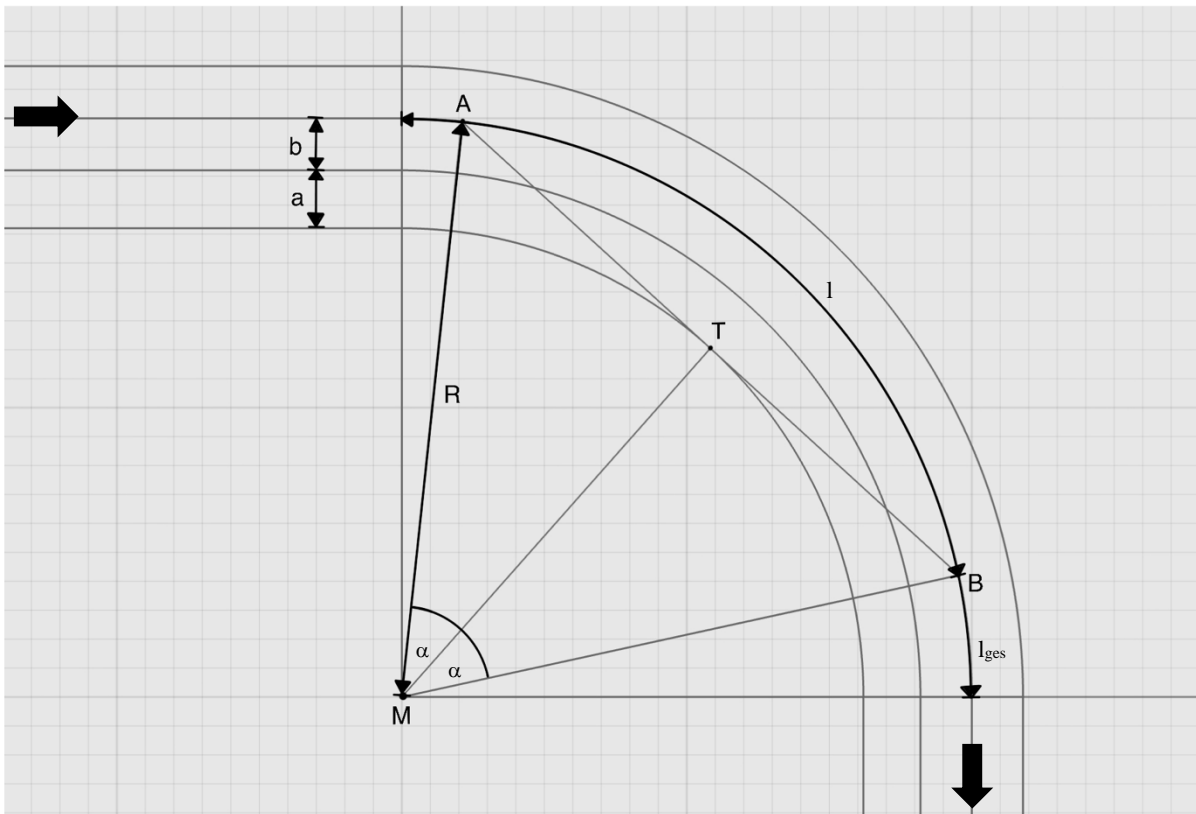
$$\tan(\beta) = \frac{d}{x_1} \Rightarrow x_1 = \frac{d}{\tan(\beta)} = \frac{R - \frac{R-a-b}{\cos\left(\frac{l \cdot 360}{2\pi R} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)\right)}}{\tan\left(\frac{l \cdot 360}{2\pi R} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)\right)}$$

$$s_{\text{vor}}(R, a, b, l) = x_1 + l = \frac{R - \frac{R-a-b}{\cos\left(\frac{l \cdot 360}{2\pi R} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)\right)}}{\tan\left(\frac{l \cdot 360}{2\pi R} - \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)\right)} + l$$

Fall 2

Die nachfolgende Skizze in Anhang 8 stellt die geometrischen Beziehungen für *Fall 2* einer möglichen Sichteinschränkung im Kurvenbereich dar. Egofahrzeug und Folgefahrzeug befinden sich innerhalb der Kurve.

Anhang 8: Skizze des Sichtweitenmodells für *Fall 2*



Bedingung:

$$\frac{4\pi R\alpha}{360} \leq l < l_{\text{ges}}; \text{ mit } \alpha = \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right) \text{ und } l_{\text{ges}} = \frac{2\pi R\kappa}{360}$$

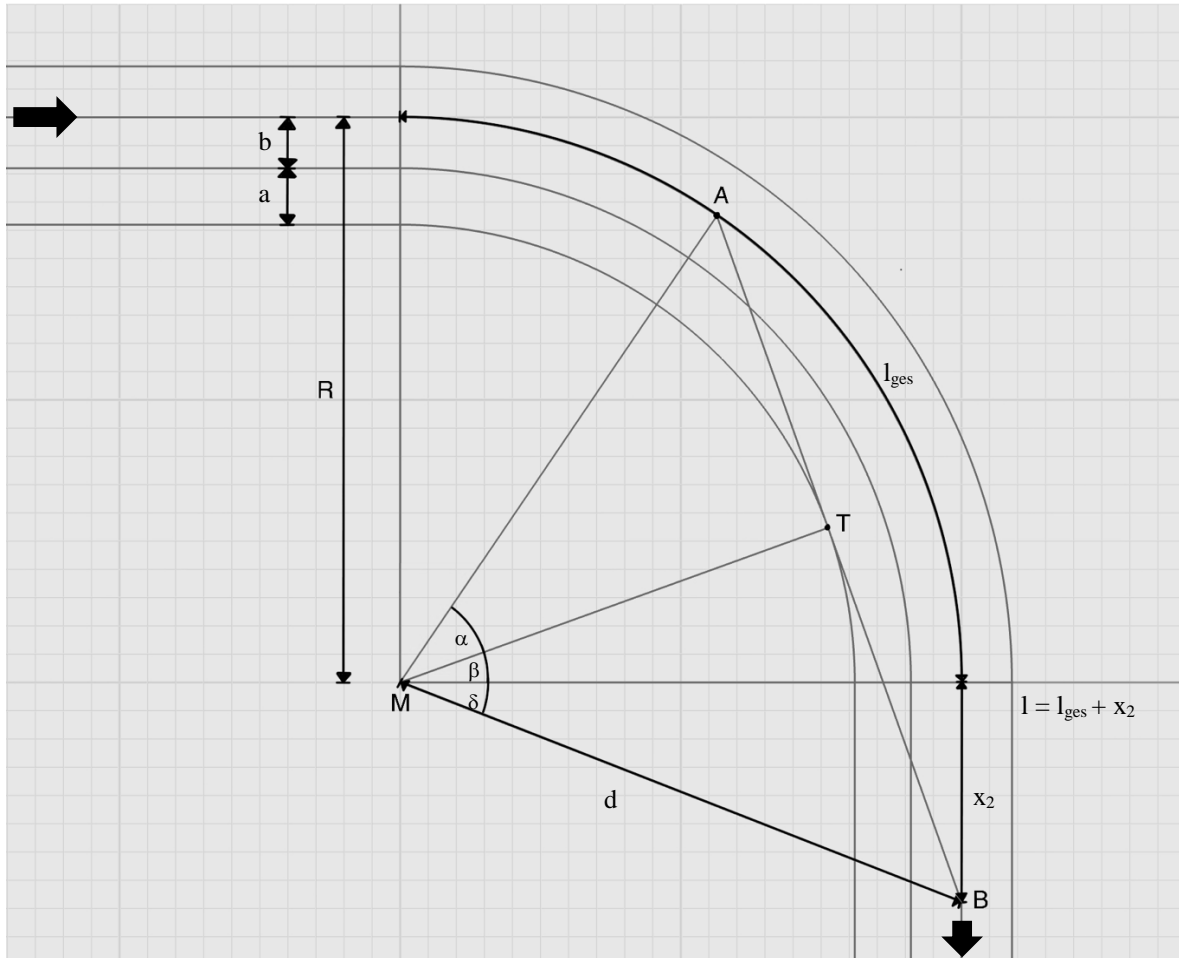
Formelzusammenhänge zur Bestimmung von s_{vor} :

$$s_{\text{vor}}(R, a, b) = 2\pi R \cdot \frac{2\alpha}{360} = \frac{4\pi R}{360} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right)$$

Fall 3

Die nachfolgende Skizze in Anhang 9 stellt die geometrischen Beziehungen für *Fall 3* einer möglichen Sicht Einschränkung im Kurvenbereich dar. Das Folgefahrzeug befindet sich innerhalb der Kurve und das Egofahrzeug außerhalb ($l \geq l_{\text{ges}}$).

Anhang 9: Skizze des Sichtweitenmodells für *Fall 3*



Bedingung:

$$l \geq l_{\text{ges}} > \frac{2\pi R \alpha}{360} \Rightarrow x_2 > 0; \text{ mit } \alpha = \arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right) \text{ und } l_{\text{ges}} = \frac{2\pi R \kappa}{360}$$

Formelzusammenhänge zur Bestimmung von s_{vor} :

$$l = l_{\text{ges}} + x_2 \Rightarrow x_2 = l - l_{\text{ges}}$$

$$l_{\text{rest}} = \frac{2\pi R}{360} \cdot (\alpha + \beta)$$

$$\tan(\delta) = \frac{x_2}{R} \Rightarrow \delta = \arctan\left(\frac{x_2}{R}\right)$$

$$\sin(\delta) = \frac{x_2}{d} \Rightarrow d = \frac{x_2}{\sin(\delta)} = \frac{x_2}{\sin\left(\arctan\left(\frac{x_2}{R}\right)\right)}$$

$$\cos(\beta + \delta) = \frac{R-a-b}{d} = \frac{R-a-b}{\frac{x_2}{\sin\left(\arctan\left(\frac{x_2}{R}\right)\right)}}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \beta &= \arccos\left(\frac{R-a-b}{\frac{x_2}{\sin\left(\arctan\left(\frac{x_2}{R}\right)\right)}}\right) - \delta = \arccos\left(\frac{R-a-b}{\frac{x_2}{\sin\left(\arctan\left(\frac{x_2}{R}\right)\right)}}\right) - \arctan\left(\frac{x_2}{R}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{(R-a-b) \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{x_2}{R}\right)\right)}{x_2}\right) - \arctan\left(\frac{x_2}{R}\right) \end{aligned}$$

$$s_{\text{vor}}(R, a, b, l, l_{\text{ges}}) = l_{\text{rest}} + x_2 = \frac{2\pi R}{360} \cdot (\alpha + \beta) + x_2$$

$$= \frac{2\pi R}{360} \cdot \left(\arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right) + \arccos\left(\frac{(R-a-b) \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{x_2}{R}\right)\right)}{x_2}\right) - \arctan\left(\frac{x_2}{R}\right) \right) + x_2$$

$$= \frac{2\pi R}{360} \cdot \left(\arcsin\left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a-b)^2}}{R}\right) + \arccos\left(\frac{(R-a-b) \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{l-l_{\text{ges}}}{R}\right)\right)}{l-l_{\text{ges}}}\right) - \arctan\left(\frac{l-l_{\text{ges}}}{R}\right) \right)$$

$$+ l - l_{\text{ges}}$$

4. Anhänge zur Anwendung der entwickelten Methodik auf eine Referenzstrecke

Nachfolgend werden die identifizierten Streckenabschnitte innerhalb der Referenzstrecke zur beispielhaften Anwendung der entwickelten Methodik dargestellt. Die einzelnen Streckenabschnitte wurden dazu nummeriert und Knotenpunkte durch rote Kreise dargestellt. Einmündungen zu nicht befahrbaren Straßen wurden definitionsgemäß nicht als Knotenpunkt erfasst. Die Darstellung der Anhänge 10-11 erfolgt auf Grund der Kartenausrichtung zum besseren Verständnis der Zusammengehörigkeit der Abschnitte vom Zielpunkt zum Startpunkt. Das Kartenmaterial wird von den OpenStreetMap-Mitwirkenden¹⁵⁶ zur Verfügung gestellt.

Die Abbildung in Anhang 10 zeigt den ersten Teil der Referenzstrecke mit den Streckenabschnitten 8, 7 und teilweise 6, ausgehend vom Zielpunkt der Route.

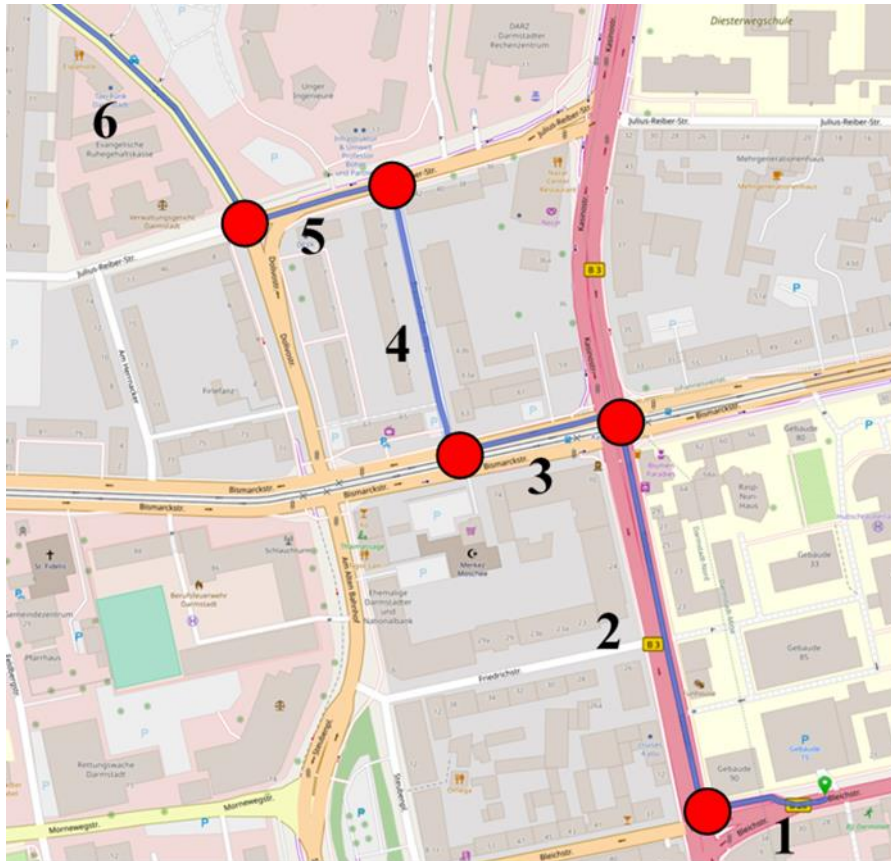
Anhang 10: Teil 1 der Referenzstrecke



¹⁵⁶ OpenStreetMap-Mitwirkende: OpenStreetMap (2020).

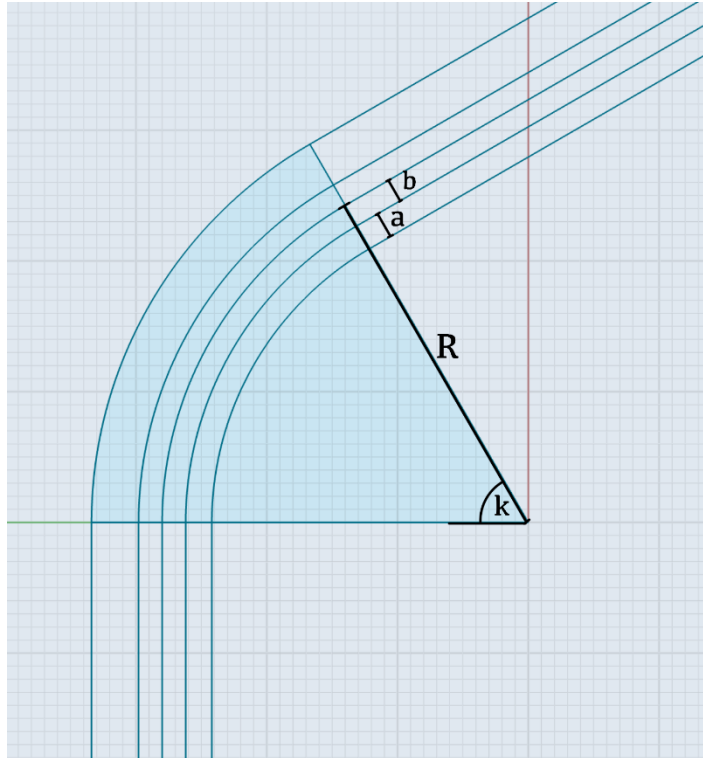
Die Abbildung in Anhang 11 zeigt den zweiten Teil der Referenzstrecke mit den Streckenabschnitten 6, 5, 4, 3, 2 und 1. Dies stellt den Bereich ab dem Startpunkt der Route dar.

Anhang 11: Teil 2 der Referenzstrecke



Die Abbildung in Anhang 12 zeigt das mittels der Satellitenbilder¹⁵⁷ abgeleitete Modell zur Darstellung der beispielhaften Kurve aus Streckenabschnitt 7.

Anhang 12: Modellableitung der Beispielkurve aus Streckenabschnitt 7



¹⁵⁷ Google Earth (2020).

Literaturverzeichnis

Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures (2018)

Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts, Lehrstuhl für Informatik 11 (Software für eingebettete Systeme)UR - <http://publications.rwth-aachen.de/record/749158>, 2018

Audi ohne "Vorsprung durch Technik" (2020) Audi ohne "Vorsprung durch Technik"; <https://www.n-tv.de/auto/Audi-ohne-Vorsprung-durch-Technik-article21749888.html>, 2020, Zugriff 07.05.2020

Bagschik, G. et al.: Framework for Safe Automated Vehicles (2018)

Bagschik, Gerrit; Nolte, Marcus; Ernst, Susanne; Maurer, Markus: A System's Perspective Towards an Architecture Framework for Safe Automated Vehicles, 2018

BMJV: Verordnung über Fahrzeugzulassung im Straßenverkehr (2011)

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: FZV - Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr; https://www.gesetze-im-internet.de/fzv_2011/BJNR013900011.html, 2011, Zugriff 11.5.2020

BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) (2013)

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Straßenverkehrs-Ordnung (StVO); http://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/, 2013, Zugriff 14.5.2020

BMVI: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) (2017)

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO); http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund_26012001_S3236420014.htm, 2017, Zugriff 14.5.2020

Breuer, B.; Bill, K. H.: Bremsenhandbuch (2017)

Breuer, Bert; Bill, Karlheinz H. (Hrsg.) Bremsenhandbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017

Breuer, B.; Essers, U.: UNICAR: Forschungs-PKW der HAG (2013)

Breuer, Bert; Essers, Ulf: UNI-CAR - Der Forschungs-PKW der Hochschularbeitsgemeinschaft (HAG); https://www.kfz.tu-berlin.de/fileadmin/fg40/13zb0237-00_Broschuere_uni-car-2.pdf, 2013

Bundesrecht: Erläuterungen zur StVO (2019)

Bundesrecht: Erläuterungen zur Straßenverkehrsordnung, 8-2-0 Bu, 2019

Carrano, C. et al.: Impacts of solar radio bursts on GPS (2009)

Carrano, Charles; Bridgwood, Christopher; Groves, Keith: Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS, in: Radio Science - RADIO SCI, Jahrgang 44, 2009

Bestehens-/ Versagensgrenzen automatisierter Fahrfunktionen (2020) Definition von Bestehens-/Versagenskriterien für das partikuläre Testen von automatisierten Fahrfunktionen, UNSPECIFIED, 2020

Die Freigabe des autonomen Fahrens (2015) Die Freigabe des autonomen Fahrens, in: Autonomes Fahren, Berlin, Heidelberg, 2015

DIN: DIN IEC 60050-351 (2014-09-00) (2014)

Deutsches Institut für Normung: DIN IEC 60050-351 (2014-09-00), 2014

DUDEN: Mission (2020)

DUDEN: Mission; <https://www.duden.de/rechtschreibung/Mission>, 2020, Zugriff 16.05.2020

DUDEN: Sicherheit (2020)

DUDEN: Sicherheit; <https://www.duden.de/rechtschreibung/Sicherheit>, 2020, Zugriff 30.04.2020

Eichhorn, U. et al.: Fahrzeugtechnische Anforderungen (2017)

Eichhorn, Ulrich; Gies, Stefan; Layfield, Jonathan; Rischbieter, Frank: Fahrzeugtechnische Anforderungen, in: Breuer, Bert; Bill, Karlheinz H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017

Engels, P.: Darmstadt Stadtlexikon - Straßennetz (2020)

Engels, Peter: Darmstadt Stadtlexikon - Straßennetz; <https://www.darmstadt-stadtlexikon.de/d/darmstadt.html>, 2020, Zugriff 23.3.2020

FGSV: Linienführung RAS-L (1995)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), 1995

FGSV: RASt (2006)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen, FGSV, Jahrgang 200, FGSV-Verl., Köln, 2006

Google Earth (2020) Google Earth; <http://www.google.de/intl/de/earth/index.html>, 2020, Zugriff 29.5.2020

Grunwald, A.: Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren (2015)

Grunwald, Armin: Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren—Analyse, Einordnung und Bewertung, in: Autonomes Fahren, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015

Handbuch Fahrerassistenzsysteme (2015) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015

Hemmerich, W. A.: Poisson-Verteilung | MatheGuru (2020)

Hemmerich, W. A.: Poisson-Verteilung | MatheGuru, 2020, Zugriff 25.5.2020

Isermann, R.: Fault-Diagnosis Systems (2006)

Isermann, Rolf: Fault-Diagnosis Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006

ISO: DIN EN ISO 14971 (2012)

International Organization for Standardization: DIN EN ISO 14971: Medizinprodukte — Anwendung des Risikomanagements auf Medizinprodukte, 2012

ISO: ISO 26262:2018 (2018)

International Organization for Standardization: ISO 26262: 2018 Road Vehicles - Functional Safety, 2018

ISO: ISO 26262-1:2018 (2018)

International Organization for Standardization: ISO 26262-1:2018 Road Vehicles - Functional Safety - Part 1: Vocabulary, 2018

ISO: ISO 26262-10:2018 (2018)

International Organization for Standardization: ISO 26262-10:2018 Road Vehicles - Functional Safety - Part 10: Guidelines on ISO 26262, 2018

ISO: ISO 26262-3:2018 (2018)

International Organization for Standardization: ISO 26262-3:2018 Road Vehicles - Functional Safety - Part 3: Concept phase, 2018

ISO: ISO/PAS 21448:2019 (2019)

International Organization for Standardization: ISO/PAS 21448:2019 - Road vehicles -- Safety of the intended functionality, 2019

Keilhoff, D.: UNICARagil – Disruptive Vehicle Concepts Architectures (2019)

Keilhoff, Dan: UNICARagil – New Architectures for Disruptive Vehicle Concepts; https://www.unicaragil.de/images/publications/2019-03-20_UNICARagil_Presentation_final.pdf, 2019

Kreativitaetstechniken.info: Brainstorming (2011)

Kreativitaetstechniken.info: Brainstorming; <https://xn--kreativittstechniken-jzb.info/brainstorming/>, 2011, Zugriff 08.05.2020

Matthei, R. et al.: Autonomes Fahren (2015)

Matthei, Richard; Reschka, Andreas; Rieken, Jens; Dierkes, Frank; Ulbrich, Simon; Winkle, Thomas; Maurer, Markus: Autonomes Fahren, in: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015

Mercedes-Benz: Mercedes-Benz Intelligent Drive

Mercedes-Benz: Mercedes-Benz Intelligent Drive; <https://www.mercedes-benz.de/passenger-cars/technology-innovation/intelligent-drive/highlights.module.html>, Zugriff 16.3.2020

Mercedes-Benz: DISTRONIC-PLUS (2020)

Mercedes-Benz: DISTRONIC-PLUS; <https://www.mercedes-benz.com/de/innovation/autonomous/mit-abstand-am-besten-assistenzsysteme-von-mercedes-benz/>, 2020, Zugriff 23.04.2020

OpenStreetMap-Mitwirkende: OpenStreetMap (2020)

OpenStreetMap-Mitwirkende: OpenStreetMap; <https://www.openstreetmap.org/copyright/de>, 2020, Zugriff 27.05.2020

Pfeil, F.: Megatrends und die dritte Revolution (2018)

Pfeil, Felix: Megatrends und die dritte Revolution der Automobilindustrie: Eine Analyse der Transformation der automobilen Wertschöpfung auf Basis des Diamantmodells; <https://www.econstor.eu/handle/10419/175349>, 2018, Zugriff 12.3.2020

Reschka, A.: Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge (2015)

Reschka, Andreas: Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge, in: Maurer, Markus et al. (Hrsg.): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015

Reschka, A.; Maurer, M.: Conditions for a safe state (2015)

Reschka, Andreas; Maurer, Markus: Conditions for a safe state of automated road vehicles, in: it - Information Technology (4), Jahrgang 57, 2015

Reschka, A. C.: Diss., Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen für automatisierte Fahrzeuge (2017)

Reschka, Andreas C.: Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung, Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2017

SAE International: Definitions for Automated Driving Systems (2016)

Society of Automotive Engineers International: J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE International, 2016

Schmiedl, R.; Behrendt, H.: Leistungen des Rettungsdienstes 2016/17 (2019)

Schmiedl, Reinhard; Behrendt, Holger: Berichte der BAST - Leistungen des Rettungsdienstes 2016/17; https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-m/2020-2019/m290.html, 2019, Zugriff 25.5.2020

Schnieder, L.; Hosse, R.: Ganzheitliches Sicherheitsverständnis für Steuerungssysteme (2019)

Schnieder, Lars; Hosse, René: Ein ganzheitliches Sicherheitsverständnis für die Entwicklung sicherheitsrelevanter elektronischer Steuerungssysteme für Kraftfahrzeuge, 2019

Spiegel: Audi ist ein Level weiter (2017)

Spiegel: Audi ist ein Level weiter; <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/audi-a8-audi-ist-beim-autonomen-fahren-ein-level-weiter-a-1169062.html>, 2017, Zugriff 23.04.2020

Stolte, T. et al.: HARA for an automated vehicle (2017)

Stolte, Torben; Bagschik, Gerrit; Reschka, Andreas; Maurer, Markus: Hazard analysis and risk assessment for an automated unmanned protective vehicle, in: Symposium, IEEE I. V. (Hrsg.): 28th IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Los Angeles, CA, USA, IEEE, [Piscataway, NJ], 2017

Strommer, J.: Haftreibungszahlen für Schiene & Straße (2020)

Strommer, Johannes: Haftreibungszahlen für Schiene & Straße; <https://www.johannes-strommer.com/mechanik/haftreibungszahlen/>, 2020, Zugriff 11.05.2020

Svensson, L. et al.: Safe Stop Trajectory Planning (2018)

Svensson, Lars; Masson, Lola; Mohan, Naveen; Ward, Erik; Brenden, Anna P.; Feng, Lei; Torngren, Martin: Safe Stop Trajectory Planning for Highly Automated Vehicles: An Optimal Control Problem Formulation, in: 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Changshu, IEEE, [S.l.], 2018

Team Waymo: 5 million self-driven miles (2018)

Team Waymo: Waymo reaches 5 million self-driven miles; <https://medium.com/waymo/waymo-reaches-5-million-self-driven-miles-61fba590fafe>, 2018, Zugriff 14.3.2020

Tesla: Autopilot

Tesla: Autopilot; https://www.tesla.com/de_DE/autopilot, Zugriff 16.3.2020

Thode, J.: Risikoanalyse-Tools: Fehlerbaumanalyse (FTA) (2017)

Thode, Janet: Risikoanalyse-Tools: Fehlerbaumanalyse (FTA); <http://mpl.loesungsfabrik.de/blog/iso-13485/fehlerbaumanalyse>, 2017, Zugriff 11.5.2020

Process for Self-Aware Automated Vehicles (2017) Towards a Skill- And Ability-Based Development Process for Self-Aware Automated Road Vehicles, 2017

Ulbrich, S. et al.: Definitionen: Szene, Situation und Szenario (2015)

Ulbrich, Simon; Menzel, Till; Reschka, Andreas; Schuldt, Fabian; Maurer, Markus: Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren, 2015

UNICARagil - Projektinformationen (2020) UNICARagil - Projektinformationen;

<https://www.unicaragil.de/de/projektinformationen.html>, 2020, Zugriff 14.3.2020

UNICARagil - Startseite (2020) UNICARagil - Startseite; <https://www.unicaragil.de/de/>, 2020, Zugriff 14.3.2020

Waymo: Waymo Safety Report (2018)

Waymo: Waymo Safety Report; <https://storage.googleapis.com/sdc-prod/v1/safety-report/Safety%20Report%202018.pdf>, 2018, Zugriff 27.04.2020

Wilhelm, U. et al.: Funktionale Sicherheit und ISO 26262 (2015)

Wilhelm, Ulf; Ebel, Susanne; Weitzel, Alexander: Funktionale Sicherheit und ISO 26262, in: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015

Wissenschaftsstadt Darmstadt: Entwicklung der Bevölkerung in Darmstadt (2019)

Wissenschaftsstadt Darmstadt: Entwicklung der Bevölkerung in Darmstadt, Darmstadt-Dieburg, Hessen und Deutschland; https://www.darmstadt.de/fileadmin/Bilder-Rubriken/Standort/Statistik_und_Stadtforschung/pdf/jahrbuch/02Bevoelkerung/K02-1.pdf, 2019

Wolff, C.: Grundlagen zum Bremsvorgang (2017)

Wolff, Claus: Grundlagen zum Bremsvorgang, in: Breuer, Bert; Bill, Karlheinz H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017

Ziegler, J. et al.: Making Bertha Drive - Autonomous Journey (2014)

Ziegler, Julius; Bender, Philipp; Schreiber, Markus; Lategahn, Henning; Strauss, Tobias; Stiller, Christoph; Dang, Thao; Franke, Uwe; Appenrodt, Nils; Keller, Christoph G.: Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route, in: IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine (2), Jahrgang 6, S. 8–20, 2014

Zollner, P.; Henn, C.: StVO-Novelle: Neue Regeln und Strafen | ADAC (2020)

Zollner, Petra; Henn, Christof: StVO-Novelle: Neue Regeln und Strafen | ADAC; <https://www.adac.de/verkehr/recht/verkehrsvorschriften-deutschland/stvo-novelle/>, 2020, Zugriff 14.5.2020