

# **Freigabeargumentation hochautomatisierter Nutzfahrzeuge im Vergleich zum menschlichen Fahrer**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

**angenommene**

**Dissertation**

von

**M.Sc. Johannes Plaum**

geb. in Siegen

Tag der mündlichen Prüfung:

29.09.2025

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Eric Sax

Korreferent:

Prof. Dr. rer. nat. Markus Enzweiler



# Kurzfassung

Das automatisierte Fahren ist eines der zentralen Forschungs- und Innovationsfelder in der Automobilindustrie. Eine entscheidende Herausforderung ist die Frage, wie Akzeptanzkriterien für die Sicherheit des Systems im Rahmen der Freigabeargumentation definiert werden können. Ziel der Argumentation ist der Nachweis, dass ein hochautomatisiertes Fahrzeug auf Basis gesellschaftlich moralischer Konzepte kein unangemessenes Risiko darstellt.

Kern der Dissertation ist der entwickelte Prozess zur Definition und Anwendung von Akzeptanzkriterien im Vergleich zum menschlichen Fahrer. Die im VVM-Projekt als Goal Structuring Notation (GSN) entwickelte Sicherheitsargumentation wird um die Prozessartifakte erweitert und ermöglicht eine strukturierte und nachverfolgbare Freigabeargumentation in Einklang mit dem szenarienbasierten Testansatz. Dabei werden explizit Akzeptanzkriterien für aggregiertes und szenarienbasiertes Verhalten berücksichtigt, deren Kombination für eine umfassende Absicherung im Vergleich zu einem menschlichen Referenzfahrer notwendig ist. Für die Gewinnung geeigneter Realdaten werden die Operational Design Domain für das System unter Test (SuT) und Anforderungen an die Datenquellen für die Akzeptanzkriterien definiert. Die Einordnung der Daten in die szenarienbasierte Struktur der Sicherheitsargumentation erfolgt durch die Anwendung der Methode der Szenarienidentifikation. Um die korrekte Definition und Anwendung sicherzustellen, werden die Akzeptanzkriterien im Rahmen des strukturierten szenarienbasierten Testansatzes definiert, für das SuT angewendet und die Testergebnisse als Nachweis in der GSN eingeordnet.

Die praktische Anwendbarkeit des Prozesses wird für zwei Anwendungsfälle im Umfeld der Absicherung von hochautomatisierten Nutzfahrzeugen nach SAE-Level 4 gezeigt.



# **Abstract**

Automated driving is one of the central fields of research and innovation in the automotive industry. A key challenge is the question how acceptance criteria for the safety of the system can be defined as part of the release argumentation. The aim of the argumentation is to prove that a highly automated vehicle does not represent an unreasonable risk based on societal moral concepts.

The core of the dissertation is the developed process for the definition and application of acceptance criteria in comparison to the human driver. The safety argumentation developed in the VVM project as goal structuring notation (GSN) is extended by the process artifacts and enables a structured and traceable release argumentation in line with the scenario-based testing approach. Acceptance criteria for aggregated and scenario-based behavior are explicitly taken into account, the combination of which is required for a comprehensive safety assurance. To obtain suitable real-world data, the operational design domain for the system under test (SuT) and the requirements for data sources to derive acceptance criteria are defined. The data is categorized within the scenario-based structure of the safety argumentation by applying a scenario identification method. To ensure correct definition and application, the acceptance criteria are defined as part of the structured scenario-based testing approach and applied to the SuT. Finally, the test results are traceable as evidence in the GSN.

The practical applicability of the process is demonstrated for two use cases in the context of highly automated commercial vehicles in accordance with SAE-Level 4.



# Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als Doktorand bei Daimler Truck und Torc Robotics in Kooperation mit dem Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) am Karlsruher Institut für Technologie. Die Arbeit wäre ohne zahlreiche Unterstützer nicht möglich gewesen, denen ich an dieser Stelle herzlich danken möchte.

Zuerst gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Eric Sax für die hervorragende Betreuung und die stets hilfreichen Rückmeldungen. Seine Unterstützung hat maßgeblich zu dieser Dissertation und meiner persönlichen Weiterentwicklung beigetragen. Ebenfalls danke ich Prof. Dr. rer. nat. Markus Enzweiler für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen Anmerkungen sowie dem Prüfungsvorsitzenden Prof. Dr.-Ing. Michael Powalla und den Prüfern Prof. Dr. Ivan Peric und Prof. Dr.-Ing. Sander Wahls.

Ein besonderer Dank gilt zudem Dr. Stefan Oexl, Dr. Janine Günther sowie Franz Vaas für die kontinuierliche Unterstützung und Förderung sowie die Möglichkeit, meine Forschung praktisch anzuwenden. Ebenso danke ich allen weiteren Kollegen sowie den Mitgliedern der Doktorandengruppe Sax für den wertvollen fachlichen Austausch, die gemeinsamen Paper und die vielen inspirierenden Gespräche. Hervorheben möchte ich hier Felix Reisgys, Thilo Braun, Joshua Ransiek, Julian Fuchs, Lennart Ries, Barbara Schütt, Jakob Langner und Arturo Tejada. Für die Unterstützung durch ihre studentischen Arbeiten danke ich Constantin Braess, Julius Bächle und Jennifer Kling.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden für ihre Ermutigung und Motivation während meiner Promotionszeit. Abschließend danke ich meiner Frau Anna von Herzen für ihre unerschöpfliche Geduld, ihr Verständnis und die Unterstützung auf allen Ebenen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> . . . . .	i
<b>Abstract</b> . . . . .	iii
<b>Danksagung</b> . . . . .	v
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	1
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Herausforderungen für die Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen . . . . .	2
1.3 Ableitung der Forschungsfragen . . . . .	4
1.4 Umfeld und Anwendung . . . . .	4
1.5 Struktur der Dissertation . . . . .	5
<b>2 Entwicklung automatisierter Fahrzeuge in der Automobilindustrie</b> . . . . .	7
2.1 Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen . . . . .	7
2.2 Automatisierungslevel nach SAE J3016 . . . . .	9
2.3 Entwicklungsprozess und -methoden . . . . .	13
2.3.1 V-Modell . . . . .	13
2.3.2 Agile Methoden . . . . .	16
2.3.3 Exemplarischer Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie . . . . .	17
2.3.4 Verifikation und Validierung . . . . .	19
2.4 Zusammenfassung und Fazit . . . . .	24

### **3 Stand der Technik und Forschung für Test und Freigabe**

<b>automatisierter Fahrzeuge</b>	<b>25</b>
3.1 Testmethoden in der Automobilindustrie	25
3.1.1 Realer Fahrversuch	25
3.1.2 Simulationsbasierte Tests	26
3.1.3 X-in-the-Loop Tests	26
3.2 Szenarienbasiertes Testen	30
3.2.1 Abstraktionsebenen für Szenarien	33
3.2.2 Ebenen-Modell zur Beschreibung der ODD	37
3.2.3 Bewertung von Szenarien	40
3.3 Absicherung und Freigabe automatisierter Fahrzeuge	44
3.3.1 Szenarienbasierte Absicherung	44
3.3.2 Anforderungen an Datenquellen	52
3.3.3 Vergleich verschiedener Datenquellen	60
3.3.4 Absicherung von Fahrfunktionen mit SAE-Level 4 und 5	70
3.3.5 Sicherheitsargumentation als Goal Structuring Notation	73
3.3.6 Menschliche Referenzmodelle für die Bewertung hochautomatisierter Fahrzeuge	78

### **4 Abgeleitete Herausforderungen und Konsequenzen** . . . . . **89**

4.1 Referenzmodelle aus UN-Regelung Nr. 157	89
4.1.1 TTC Metrik	92
4.1.2 Modell eines geübten menschlichen Fahrers	93
4.1.3 Fuzzy Safety Modell	97
4.1.4 Evaluierung der Modelle	105
4.1.5 Zusammenfassung	109
4.2 Herausforderungen und Problemstellung für die Freigabe hochautomatisierter Nutzfahrzeuge	110
4.2.1 Anforderungen an Prozess zur Freigabeargumentation	110
4.2.2 Randbedingungen des Prozesses für hochautomatisierte Nutzfahrzeuge	113

4.3	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	114
<b>5</b>	<b>Neuer Prozess zur strukturierten Freigabeargumentation hochautomatisierter Nutzfahrzeuge . . . . .</b>	<b>115</b>
5.1	Entwicklung des Prozesses . . . . .	115
5.1.1	Prozessschritt 1: Definition und Einordnung von Akzeptanzkriterien . . . . .	116
5.1.2	Prozessschritt 2: Szenarienbasierte Datenauswahl . . . . .	118
5.1.3	Prozessschritt 3: Anwendung der Akzeptanzkriterien als Teil der szenarienbasierten Freigabeargumentation . . . . .	121
5.1.4	Zusammenfassung . . . . .	123
5.2	Erweiterung der VVM-Sicherheitsargumentation . . . . .	123
5.3	Einordnung in den szenarienbasierten Testprozess . . . . .	127
5.3.1	Abstraktionsebenen von Szenarien . . . . .	128
5.3.2	Bewertung von Szenarien . . . . .	129
5.4	Einordnung in Freigabeargumentation . . . . .	130
5.4.1	Vergleich mit Zielen der ISO 21448 . . . . .	130
5.4.2	Bekannte unsichere Szenarien . . . . .	131
5.4.3	Unbekannte unsichere Szenarien . . . . .	133
5.4.4	Zusammenfassung . . . . .	134
5.5	Einordnung in exemplarischen Entwicklungsprozess . . . . .	135
5.6	Einschränkungen . . . . .	136
5.7	Zusammenfassung . . . . .	138
<b>6</b>	<b>Anwendung auf aggregierte Akzeptanzkriterien für die Freigabe hochautomatisierter Nutzfahrzeuge . . . . .</b>	<b>139</b>
6.1	Definition und Einordnung Akzeptanzkriterium für aggregiertes Verhalten . . . . .	141
6.1.1	Auswahl eines menschlichen Referenzfahrers . . . . .	143
6.1.2	Definition Akzeptanzkriterium im Vergleich zum IFTD als Referenzfahrer . . . . .	144
6.2	Szenarienbasierte Datenauswahl . . . . .	145
6.2.1	Szenariendefinition . . . . .	145

6.2.2	Identifikation geeigneter Datenquellen . . . . .	147
6.2.3	Gewinnung und Einbindung von Realdaten in den szenarienbasierten Testprozess . . . . .	148
6.3	Anwendung der Akzeptanzkriterien als Teil der szenarienbasierten Freigabeargumentation . . . . .	154
6.3.1	Szenarienbasierte Modelldefinition . . . . .	154
6.3.2	Anwendung des Modells zur SuT-Bewertung . . . . .	158
6.4	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	160
<b>7</b>	<b>Anwendung auf szenarienbasierte Akzeptanzkriterien für hochautomatisierte Nutzfahrzeuge . . . . .</b>	<b>163</b>
7.1	Definition und Einordnung Akzeptanzkriterium für szenarienbasiertes Verhalten . . . . .	165
7.1.1	Auswahl eines menschlichen Referenzfahrers . . . . .	165
7.1.2	Definition Akzeptanzkriterium im Vergleich zum Referenzfahrer aus UN-Regelung Nr. 157 . . . . .	179
7.2	Szenarienbasierte Datenauswahl . . . . .	181
7.2.1	Szenariendefinition . . . . .	183
7.2.2	Identifikation geeigneter Datenquellen für kritische Realdaten . . . . .	183
7.2.3	Gewinnung und Einbindung von kritischen Realdaten in den szenarienbasierten Testprozess . . . . .	184
7.3	Anwendung der Akzeptanzkriterien als Teil der szenarienbasierten Freigabeargumentation . . . . .	196
7.3.1	Szenarienbasierte Modelldefinition . . . . .	198
7.3.2	Anwendung des Modells zur SuT-Bewertung . . . . .	214
7.4	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	216
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>219</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	219
8.2	Wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	221
8.3	Ausblick . . . . .	223
<b>Literatur</b>		<b>225</b>

<b>Eigene Publikationen</b>	<b>251</b>
<b>Patente</b>	<b>253</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>255</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>257</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>263</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>267</b>

## **Anhang**

<b>A Anhang</b>	<b>273</b>
A.1 Parameter der ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157	273
A.2 Vergleich der Kollisionsregionen für kombiniertes Einscher- und Bremsszenario	276



# **1 Einleitung**

## **1.1 Motivation**

Das automatisierte Fahren ist aktuell eines der wichtigsten Forschungsthemen in der Automobilbranche. Dabei erfolgt eine schrittweise Einführung neuer Fahrerassistenz- und Automatisierungssysteme, wie Abstands- und Spurhalteassistenten bis hin zu aktuellen Staubiloten für die Autobahn [1]. Das Ziel der eingeführten Systeme ist insbesondere die Erhöhung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts, da der menschliche Fahrer durch die Systemfunktionen unterstützt und entlastet wird. Neben dem Einsatz der Automatisierungssysteme in PKW ist auch bei schweren Nutzfahrzeugen die Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr eine zentrale Motivation für die Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen. Nach Angaben der Federal Motor Carrier Safety Administration (FMCSA) starben in den USA im Jahr 2018 ca. 4950 Menschen bei Unfällen, an denen Lastkraftwagen (LKW) beteiligt waren [2]. Daher setzen Hersteller und Gesetzgeber auch bei LKW auf die Einführung von Fahrerassistenz- und Automatisierungssystemen, um die Zahl und Schwere der Unfälle zu reduzieren. Besonders der Einsatz eines automatisierten LKW im Fernverkehr bietet eine attraktive Einsatzmöglichkeit der Technologie, da in den USA im Jahr 2019 ca. 72 % aller Waren per LKW transportiert wurden [3]. Zusätzlich wurde in einer jährlich vom American Transportation Research Institute (ATRI) durchgeführten Studie in den Jahren 2017 bis 2020 das Fehlen von Fahrern als größte Herausforderung der Transportindustrie angegeben [4]. Aktuelle Schätzungen gehen von ca. 60.000 fehlenden Fahrern aus, wobei trotz steigender Gehälter ein deutlicher Anstieg im kommenden Jahrzehnt erwartet wird. Hier ergibt sich ein wirtschaftlich und gesellschaftlich relevanter Anwendungsfall,

wenn der menschliche Fahrer durch ein automatisiertes System ersetzt wird. Neben der Einsparung von Personalkosten spielt auch die Erhöhung der effektiven Einsatzzeit eine Rolle, da ein automatisiertes System - anders als ein menschlicher Fahrer - keine Lenkzeiten einhalten muss. Ein möglicher Anwendungsfall ist in Abb. 1.1 dargestellt und umfasst den Einsatz automatisierter LKW von Hub zu Hub. Als Hub wird ein auf einem Rastplatz oder nahe der Autobahn gelegenes Logistikzentrum bezeichnet. Kern der Idee ist, dass auf Fernstrecken zwischen den Hubs ein Betrieb ohne menschlichen Fahrer erfolgt. Ein solches System mit Society of Automotive Engineers (SAE)-Level 4 ohne menschliche Fahrer als Rückfallebene wird als „Highly Automated“ bzw. hochautomatisiert bezeichnet [5]. Die Warenlieferung von und zu den Hubs wird von menschlichen Fahrern übernommen, wodurch die Komplexität des Einsatzgebiets der automatisierten LKW reduziert werden kann, da z. B. kein Einsatz in innerstädtischen Bereichen notwendig ist.

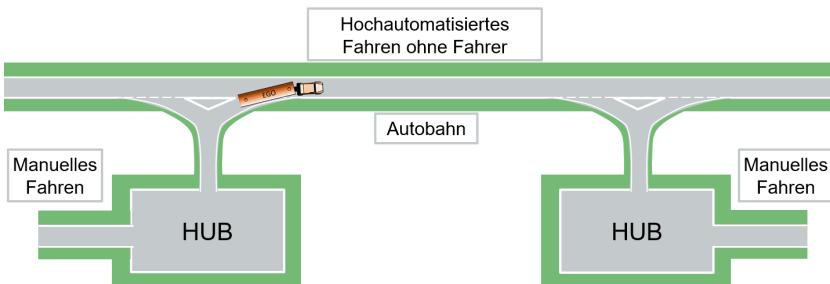


Abbildung 1.1: Darstellung des Anwendungsfalls Hub zu Hub

## 1.2 Herausforderungen für die Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen

Eine besondere Herausforderung bei der Einführung neuer Fahrerassistenz- und Automatisierungssysteme stellt die Absicherung der Fahrfunktionen dar. Da im realen Straßenverkehr stetig neue Situationen auftreten, spricht man von „Unbekannten Unbekannten“ (engl. „Unknown Unknowns“). Damit werden Betriebsbedingungen bezeichnet, die bei der Spezifikation des Systems

nicht identifiziert oder in der Modellierung nicht berücksichtigt wurden [6]. Die verwandte Bezeichnung „Black Swan“ beschreibt sehr seltene und plötzlich auftretende Zustände, die zu einem unsicheren Verhalten des Systems führen können. Auch bereits bekannte Szenarien, wie z.B. verlorene Ladung oder Fußgänger auf einer Autobahn, stellen für die Absicherung eine Herausforderung dar, da sie in der Realität sehr selten auftreten. Es resultiert eine hohe Zahl an erforderlichen Testkilometern, um das Systemverhalten statistisch in diesen Situationen abzusichern. Wachenfeld und Winner zeigen in [7], dass für eine statistische Absicherung eines Autobahnpiloten ca. 6,6 Milliarden Testkilometer auf der Autobahn notwendig wären. Dies ist wirtschaftlich nicht mit realen Erprobungsfahrten realisierbar, weshalb simulative Test- und Absicherungsmethoden zum Einsatz kommen. Diese bieten eine kostengünstigere Alternative gegenüber realen Versuchsfahrten, um während der Entwicklungsphase schnell und iterativ Änderungen der Software zu testen [8]. Außerdem spielt die Simulation eine zunehmend wichtigere Rolle für die Freigabe der Fahrfunktionen, um das funktionale Verhalten des Systems in allen relevanten Verkehrssituationen nachzuweisen. Dazu werden verschiedene Testmethoden eingesetzt, wie das anforderungsbasierte Testen der in der Spezifikation definierten Systemeigenschaften. Außerdem können reale Verkehrssituationen nachgebildet und simuliert werden. Hier kann auf Erprobungsdaten und auf Datenbanken mit aufgezeichneten Unfällen zurückgegriffen werden, um einen sicheren Einsatz des Systems im Vergleich zum menschlichen Fahrer auch für diese Situationen zu zeigen [9].

Den Stand der Technik bildet das szenarienbasierte Testen, bei dem Szenarien anhand von Parametern eindeutig definiert und für beliebige Parameterkombinationen getestet werden. Dabei ist zur Reduzierung der notwendigen Simulationen eine Konzentration auf Szenarien möglich, bei denen herausfordernde oder sicherheitsrelevante Verkehrssituationen auftreten [10].

## 1.3 Ableitung der Forschungsfragen

Basierend auf den beschriebenen Herausforderungen leiten sich die folgenden Forschungsfragen ab, die sich für die Definition von Akzeptanzkriterien für die Sicherheit eines hochautomatisierten Fahrzeugs im Vergleich zum menschlichen Fahrer sowie die Gewinnung und Einbindung von Realdaten in die Freigabeargumentation ergeben.

**F1: Wie kann der Vergleich des System under Test (SuT) zum menschlichen Fahrer als strukturierter Beitrag zur Freigabeargumentation formuliert werden?**

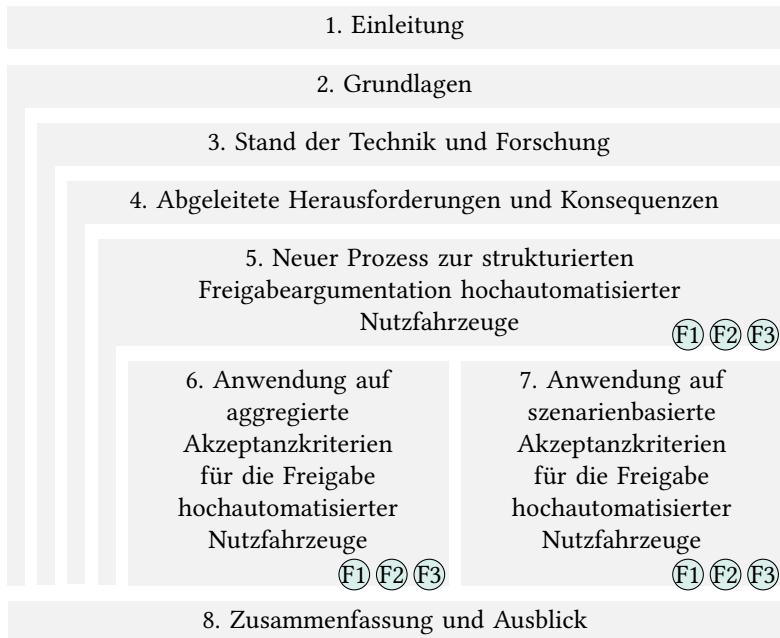
**F2: Wie können Realdaten für die Definition von Akzeptanzkriterien gewonnen werden?**

**F3: Wie können Akzeptanzkriterien für den Vergleich der Performance des SuT zum menschlichen Fahrer korrekt angewendet werden?**

## 1.4 Umfeld und Anwendung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen eines Projekteinsatzes in den Abteilungen „Autonomous Technology Group“ der Daimler Truck AG und „Virtual Validation - Behavior Simulation“ der Torc Europe GmbH, einer unabhängigen Tochtergesellschaft der Daimler Truck AG. Torc strebt die Einführung eines hochautomatisierten und fahrerlosen LKW nach SAE-Level 4 für den Warentransport zwischen Logistikzentren für den US-amerikanischen Markt an. Somit stand für den entwickelten Prozess die unmittelbare Anwendbarkeit des Ansatzes in einem internationalen Entwicklungsprojekt im Fokus.

## 1.5 Struktur der Dissertation



**Abbildung 1.2:** Struktur der Dissertation



## **2 Entwicklung automatisierter Fahrzeuge in der Automobilindustrie**

Im Folgenden werden als Grundlage des automatisierten Fahrens die Klassifikationen automatisierter Fahrzeuge vorgestellt. Anschließend werden Entwicklungsprozesse der Software- und Automobilbranche eingeführt, die bei der Freigabe automatisierter Fahrzeuge Anwendung finden.

### **2.1 Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen**

Mit der zunehmenden Verbreitung von Fahrerassistenz- und Automatisierungsfunktionen übernehmen die Systeme weitere Teile der Fahraufgabe des Menschen. Aktive und passive Sicherheitsfunktionen zur Milderung von Unfallfolgen greifen erst unmittelbar vor einem Unfall z.B. durch Airbags zur Reduzierung der Unfallschwere oder Vereinfachung von Rettungsmaßnahmen ein [11]. Stabilisierungssysteme wie die elektronische Stabilitätskontrolle (Electronic Stability Control (ESC)) erhöhen durch aktive Eingriffe die Fahrstabilität und unterstützen den Fahrer in dynamischen Fahrsituationen. Fokus dieser Systeme ist die Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr, indem der Mensch in Situationen unterstützt wird, in denen er die Fahraufgabe nicht ausreichend erfüllen kann [12]. Mit der Entwicklung von Assistenzsystemen rückt zusätzlich zur Verkehrssicherheit der Komfortaspekt in den Fokus der Entwicklung. Dabei wird der Fahrer in alltäglichen

Fahrsituationen durch die teilweise Übernahme der Fahraufgabe durch das System unterstützt und entlastet [13].

Eine Unterscheidung der Begriffe Fahrerassistenzsystem, bzw. Driver Assistance System (DAS) und Advanced Driver Assistance System (ADAS) wurde im von der EU-geförderten Forschungsprojekt RESPONSE 3 [14] getroffen und von Schmidt zusammengefasst als:

**Definition Fahrerassistenzsystem, DAS:** *Ein Fahrerassistenzsystem ist ein Assistenzsystem, das den Fahrer durch Informationen oder Warnungen auf der Lenkungsebene unterstützt und sich vorwiegend auf Sensordaten von Fahrzeugumfeld erfassenden Sensoren stützt [11].*

In diese Kategorie fallen unterstützende Systeme wie ein Regensensor oder eine Verkehrszeichenerkennung ebenso wie warnende Funktionen wie eine Spurverlassens- oder Müdigkeitswarnung [15].

**Definition Aktives Fahrerassistenzsystem, ADAS:** *Ein Aktives Fahrerassistenzsystem ist ein Fahrerassistenzsystem, das autonom Aktionen ausführt, die direkten Einfluss auf die dem Aktiven Fahrerassistenzsystem als Information zur Verfügung stehenden Sensormessgrößen haben, indem es z. B. aktiv in die Fahrzeuglängs und / oder Querregelung auf der Lenkungsebene eingreift [11].*

Zu den ADAS zählen z. B. der Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC), Spurhalteassistenten (Automated Lane-Keeping System, ALKS) oder Einparkassistenten.

**Definition Automated Driving System (ADS):** *Die Hardware und Software, die gemeinsam in der Lage sind, die gesamte DDT dauerhaft durchzuführen, unabhängig davon, ob sie auf eine bestimmte Operational Design Domain (ODD) beschränkt ist. [5]*

Den ADS zugeordnet werden Systeme wie ein Stau- oder Autobahnpilot sowie ein automatisierter Parkservice [16].

ADS wie Roboter-Taxis und fahrerlose Nutzfahrzeuge zielen auf neue Anwendungsfälle ab, bei denen der Personen- oder Warentransport zwischen Start- und Zielort vollständig ohne menschlichen Fahrer an Bord durch das System durchgeführt wird. Daher liegt auf diesem Anwendungsfall der Fokus der aktuellen Entwicklung und Forschung bei Nutzfahrzeugen sowie dieser Dissertation. Nachfolgend wird die Abgrenzung von Fahrerassistenz- und Automatisierungssystemen eingeführt.

## 2.2 Automatisierungslevel nach SAE J3016

Den international verwendeten Standard für die Klassifikation von automatisierten Fahrzeugen bildet die erstmals 2014 veröffentlichte Norm SAE J3016 [17]. Hierin werden sechs Automatisierungslevel definiert, die in Tabelle 2.1 dargestellt sind.

Die SAE-Level werden anhand von vier Bewertungskriterien unterschieden. Die ersten drei Kriterien betrachten, ob der zugehörige Teil der Fahraufgabe durch den menschlichen Fahrer oder das System übernommen wird [5]. Nach SAE J3016 [5] wird der wesentliche Anteil der Fahraufgabe als Dynamic Driving Task (DDT) bezeichnet. Nicht Teil der DDT sind strategische Funktionen, die das Ziel und die langfristige Route ermitteln.

1. **DDT** - Laterale und longitudinale Regelung: Die Fahrzeugführung umfasst die kontinuierliche Ausführung der Lenk- sowie Beschleunigungs- und Bremsbefehle.
2. **DDT** - OEDR: Zur Object and Event Detection and Response (OEDR) zählen die Umgebungsüberwachung, die Objekt- und Situationserkennung sowie die Planung der Fahrzeugreaktion auf die erkannte Situation.
3. **DDT** - Rückfallebene: Fähigkeit zur Überführung des Fahrzeugs in einen risikominimalen Zustand im Falle eines Systemfehlers oder beim Verlassen der vorgesehenen Betriebsbedingungen. Hierfür kann z. B. das Abstellen des Fahrzeugs auf dem Seitenstreifen notwendig sein.

Als viertes Kriterium werden die als Operational Design Domain (ODD) bezeichneten und für das System vorgesehenen Betriebsbedingungen unterschieden [5]:

4. **ODD:** Die ODD umfasst Umwelt- und Wetterbedingungen, die geografische Lage und Tageszeit sowie Verkehrs- und Straßeneigenschaften. Hierzu zählt ebenso der explizite Ausschluss von Bedingungen, unter denen kein sicherer Betrieb des Systems beabsichtigt oder möglich ist.

**Tabelle 2.1:** Automatisierungslevel nach SAE [18]

Level	Bezeichnung	DDT Lat. & long. Regelung	DDT OEDR	DDT Rückfall- ebene	ODD
<b>Dies sind Systeme zur Unterstützung des Fahrers</b>					
0	No Automation	Fahrer	Fahrer	Fahrer	-
1	Driver Assistance	Fahrer / System	Fahrer	Fahrer	Eingeschränkt
2	Partial Automation	System	Fahrer	Fahrer	Eingeschränkt
<b>Dies sind automatisierte Fahrfunktionen</b>					
3	Conditional Automation	System	System	Fahrer	Eingeschränkt
4	High Automation	System	System	System	Eingeschränkt
5	Full Automation	System	System	System	Uneingeschränkt

**Automatisierungslevel 0:** Nach [18] werden alle Teile der Fahraufgabe vollständig vom menschlichen Fahrer übernommen und es liegt keine Automatisierung vor. Warnende Systeme zur Umgebungsüberwachung ohne Eingriff in die Quer- oder Längsführung des Fahrzeugs zählen in diese Kategorie, z.B. Spurhaltewarnsysteme [15]. Auch eingreifende Systeme wie Notbrems-Assistenzsysteme können in diese Kategorie fallen, wenn ausschließlich eine Verstärkung der Fahrerreaktion erfolgt.

**Automatisierungslevel 1:** Systeme mit Automatisierungslevel 1 übernehmen entweder die Längs- oder Querführung des Fahrzeugs. Das System muss jederzeit vom Fahrer überwacht werden und schaltet sich bei Fahrereingriff sofort ab. Die Verantwortung für die Umfeldüberwachung liegt ausschließlich beim Fahrer. Fahrerassistenzsysteme wie Adaptive Cruise Control (ACC) und Automated Lane-Keeping System (ALKS) zählen zu dieser Ebene.

**Automatisierungslevel 2:** Systeme mit Automatisierungslevel 2 übernehmen gleichzeitig die Längs- und Querregelung des Fahrzeugs. Der Fahrer muss das System und die Umgebung dauerhaft überwachen und jederzeit bereit sein, die vollständige Fahraufgabe zu übernehmen. Damit bildet der Fahrer die Rückfallebene. Zu dieser Ebene zählen Stau- oder Autobahnassistenten.

**Automatisierungslevel 3:** Erst ab Automatisierungslevel 3 übernimmt das System bei Aktivierung die Umgebungsüberwachung zusätzlich zur Längs- und Querführung. Die Funktion ist unter bestimmten Betriebsbedingungen verfügbar, deren Grenze das System selbstständig erkennt. Bei einer Aufforderung durch das System muss der Mensch innerhalb einer „komfortablen Übernahmezeit“ [18] die Fahrzeugführung übernehmen und bildet weiterhin die Rückfallebene. Gemäß [5] ist die Bezeichnung ADS spezifisch für Systeme mit SAE-Level 3 oder höher.

Als erstes serienreifes System dieser Kategorie wurde der Staupilot von Audi präsentiert, aber aufgrund von zuvor ungeklärten rechtlichen Rahmenbedingungen nicht auf den Markt gebracht [1]. Hier wird deutlich, dass neben den technischen Systemgrenzen auch die gesetzlichen Vorgaben für Zulassung und Betrieb von automatisierten Fahrzeugen im Straßenverkehr die ODD maßgeblich beeinflussen.

Als erstes System dieser Klasse hat der „DRIVE PILOT“ von Mercedes-Benz im Jahr 2021 eine Systemgenehmigung durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) auf Basis der UN-Regelung Nr. 157 [19] erhalten. Abhängig von lokalen gesetzlichen Regelungen bildet die Freigabe die Grundlage für die Zulassung

des Systems in den ECE-Vertragsstaaten. In Deutschland ist damit der Verkauf des Systems basierend auf den Regelungen der Straßenverkehrsgesetzes (StVG) seit 2022 möglich [20].

**Automatisierungslevel 4:** Automatisierungssysteme mit Level 4 unterscheiden sich von der vorherigen Ebene durch die Ausführung der Rückfallebene durch das System. Das System übernimmt die Fahrzeugführung sowie Umfeldüberwachung und erkennt seine Systemgrenzen eigenständig. Ein Fahrer an Bord kann die Fahraufgabe übernehmen, wenn er dies anfordert oder das System eine Übernahme vor Ausführung des Manövers der Rückfallebene anfordert. Nach [5] ist kein menschlicher Fahrer an Bord notwendig, da das System das Fahrzeug eigenständig in einen risikominimalen Zustand überführen kann, wenn es seine ODD verlässt. Das System beherrscht alle Bedingungen innerhalb seiner ODD, die z. B. durch bestimmte Einsatzgebiete oder Straßentypen eingeschränkt ist. Eine Beispieldarstellung dieser Ebene ist ein LKW, der auf spezifischen Autobahnstrecken zwischen Raststätten ohne menschlichen Fahrer an Bord operiert.

**Automatisierungslevel 5:** Systeme mit dem höchsten Automatisierungslevel 5 übernehmen die Fahrzeugführung, Umgebungsüberwachung und Rückfallebene in allen Betriebsbedingungen. Dazu zählen alle Verkehrssituationen, Geschwindigkeitsbereiche und Wetterbedingungen. Während der gesamten Fahrt ist kein Fahrer notwendig, z. B. beim Anwendungsfall eines Roboter-Taxis.

In der neuesten Überarbeitung der SAE J3016 [5] wird in Zusammenarbeit mit der International Organization for Standardization (ISO) die Benennung der SAE Automatisierungslevel 0-2 als unterstützende Funktionen und der Level 3-5 als automatisierte Fahrfunktionen (engl. ADS) eingeführt (vgl. Tabelle 2.1). Außerdem wird für die Unterscheidung zwischen Automatisierungslevel 3 und 4 betont, dass der Fahrer bei Level 3 die Fahrzeugführung übernehmen muss, wenn das System dies anfordert.

Weitere Klassifikationen von Automatisierungsleveln wurden zuvor von der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [21] und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [22] definiert. Der Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) hat das Level „Fahrerlos“ ergänzt [23], das in der Klassifikation nach BASt nicht enthalten ist. Nach NHTSA umfasst die Stufe „Full Self-Driving“ die Automatisierungslevel 4 und 5, da keine Unterscheidung nach Betriebsbedingungen getroffen wird.

Problematisch an den verschiedenen Definitionen ist im deutschen Sprachraum insbesondere die inkonsistente Verwendung der Begriffe „hochautomatisiertes Fahren“ und „vollautomatisiertes Fahren“ für Automatisierungslevel 3 bzw. 4 nach BASt sowie 4 und 5 nach SAE J3016 (engl. High/Full Automation).

In dieser Dissertation wird daher die Klassifikation der Automatisierungslevel nach SAE J3016 verwendet. Besondere Bedeutung hat dies für eine eindeutige Klassifikation des betrachteten Anwendungsfalls von Nutzfahrzeugen ohne menschlichen Fahrer an Bord. Diese entsprechen SAE-Level 4 (hochautomatisiert bzw. High Automation), da das System selbstständig in der Lage sein muss, das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand zu überführen. Dabei handelt es sich jedoch noch nicht um ein System nach SAE-Level 5, da das System gemäß des Anwendungsfalls Hub zu Hub nur in einer eingeschränkten ODD eingesetzt werden kann.

## 2.3 Entwicklungsprozess und -methoden

### 2.3.1 V-Modell

Der Fokus der nachfolgend vorgestellten Entwicklungsprozesse und -methoden liegt auf Vorgehensmodellen der System- und Softwareentwicklung sowie der Herausforderung der Verifikation und Validierung von automatisierten Fahrfunktionen.

Ein etabliertes Vorgehensmodell für den Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie ist das V-Modell [24]. Dieses Modell stellt einen durchgängigen Prozess in der Software-Entwicklung dar. Das V-Modell hat ebenfalls Einzug gefunden in Standards wie die ISO 26262 [25] und Automotive SPICE [26] und zählt zum Stand der Technik bei der funktionalen Absicherung von Fahrzeugen.

Die Ziele des V-Modells fassen [24] zusammen:

- Verbesserung der Kommunikation zwischen allen Beteiligten
- Eindämmung der Gesamtkosten
- Verbesserung und Gewährleistung der Qualität
- Minimierung der Projektrisiken

Das ursprüngliche V-Modell wurde 1992 veröffentlicht [27]. Die Weiterentwicklung V-Modell 1997 definiert die vier Submodule Systemerstellung (SE), Projektmanagement (PM), Qualitätssicherung (QS) und Konfigurationsmanagement (KM) [24]. Zusätzlich werden als Grundelemente die Produkte, Rollen und Aktivitäten beschrieben, die während des Entwicklungsprozesses auftreten können [16].

In der Software- und Automobilentwicklung wird das Submodul Systemerstellung des V-Modell 1997 als Referenz verwendet [26]. Abb. 2.1 zeigt eine Übersicht des V-Modells nach [28].

Der linke absteigende Ast des V-Modells umfasst die Entwicklung und Auslegung des Systems (Top down), während der rechte aufsteigende Ast die Verifikation und Validierung beinhaltet (Bottom up) [29]. Dabei findet auf den einzelnen Ebenen jeweils ein Abgleich der spezifizierten Anforderungen mit dem implementierten System statt. Dieser Abgleich basiert auf einem Testkonzept, das z. B. von Schuldt in [30] näher beschrieben wird. Die Erstellung der Testfälle erfolgt nach verschiedenen Ansätzen. Ausgehend von der Systemspezifikation werden Testfälle in einem Lastenheft spezifiziert. Außerdem können Testfälle auf Basis einer Risikoanalyse erstellt werden. Eine weitere Methode ist die Erstellung von Testfällen zur Abdeckung der Schnittstellen zwischen Komponenten und Systemen.

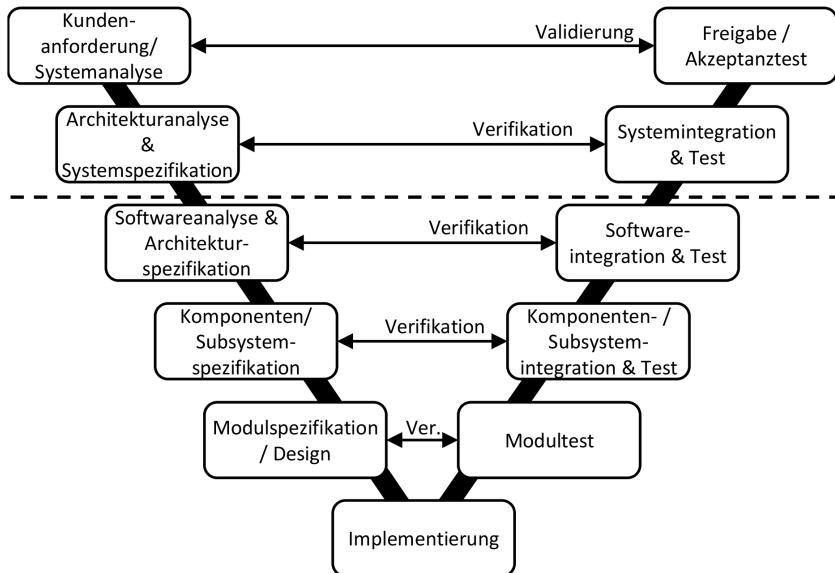


Abbildung 2.1: V-Modell [28] (basierend auf [8], [31] und [29])

Bei der idealisierten Anwendung wird der Entwicklungsprozess einmalig entlang des V-Modells durchgeführt. Dafür muss eine vollständige Definition der Anforderungen vorliegen, die während der Entwicklungszeit nicht verändert wird [28]. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Lösung bereits bekannt und umsetzbar ist. Liegen diese Bedingungen in der Praxis nicht vor, müssen die einzelnen Schritte des V-Modells mehrfach oder iterativ durchgeführt werden. Dabei kann das V-Modell auch mehrfach durchlaufen werden [32]. Als Weiterentwicklung wurde 2006 das V-Modell XT veröffentlicht [27]. Der Namenszusatz „XT“ steht für „eXtreme Tailoring“ und beschreibt die verbesserte Anpassbarkeit des Modells für verschiedene Projekte und Organisationen [33].

### 2.3.2 Agile Methoden

Bei innovativen Anwendungsgebieten wie dem automatisierten Fahren können sich während der Entwicklungsphase Änderungen der Anforderungen ergeben. Möglicherweise liegen zusätzlich für neue Problemstellungen noch keine erprobten Lösungen vor. Dies stellt eine Herausforderung für das Vorgehen nach dem V-Modell dar, da dort die Anforderungen zu Beginn des Projekts als bekannt und die Projektdauer als stabil vorausgesetzt wird [34]. Daher werden in der Automobilentwicklung zunehmend agile Entwicklungsmethoden eingesetzt, die einem Entwicklungsprozess mit frühen Teilergebnissen folgen [35]. Der Ansatz stammt aus der Softwareentwicklung und bietet eine höhere Flexibilität bei Änderungen der Anforderungen während des Entwicklungsprozesses.

Die 12 Prinzipien der agilen Softwareentwicklung wurden 2001 mit der Veröffentlichung des „Agilen Manifests“ [36] formuliert. Einer der verbreitetsten Ansätze ist Scrum [37], dessen Framework in Abb. 2.2 dargestellt ist. Die Entwicklung nach Scrum erfolgt in Sprints, die typischerweise zwei bis vier Wochen dauern.

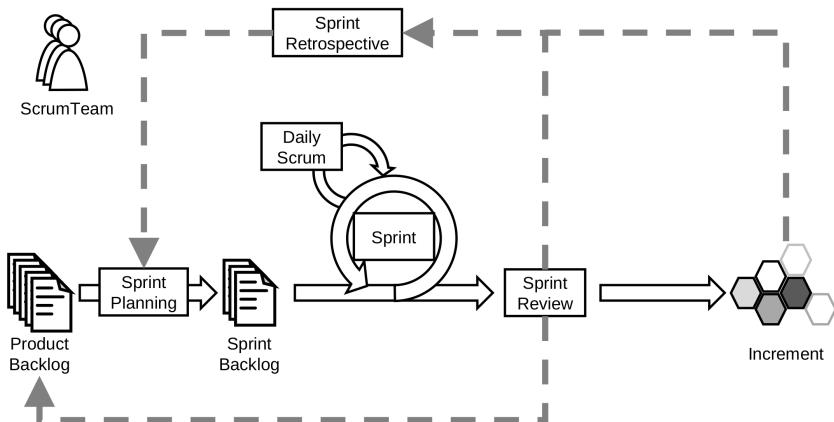


Abbildung 2.2: Scrum Framework aus [16], basierend auf [37]

Innerhalb des Frameworks existieren die drei Rollen Scrum Team, Product Owner und Scrum Master. Der Product Owner ist für die Definition von Arbeitspaketen zur Erreichung des Produktziels verantwortlich. Diese Arbeitspakete werden als Storys bezeichnet und in einem Backlog gesammelt. Das Scrum Team legt basierend auf der Priorisierung durch den Product Owner zu Beginn eines Sprints fest, welche Stories in diesem Sprint bearbeitet werden können. Der Scrum Master achtet auf die Einhaltung des Scrum Frameworks und unterstützt das Scrum Team in organisatorischer Weise und als Vermittler [37]. Als Ergebnis des Sprints entsteht ein abgeschlossenes Product Increment, das als Baustein zur Erreichung des Produktziels beiträgt, das auch als Minimum Viable Product (MVP) bezeichnet wird. Abgeschlossen wird der Sprint durch Sprint Review und Sprint Retrospective, in denen die Ergebnisse den Stakeholdern präsentiert werden und im nächsten Sprint Planning neue Anforderungen aus dem Backlog für den nächsten Sprint festgelegt werden.

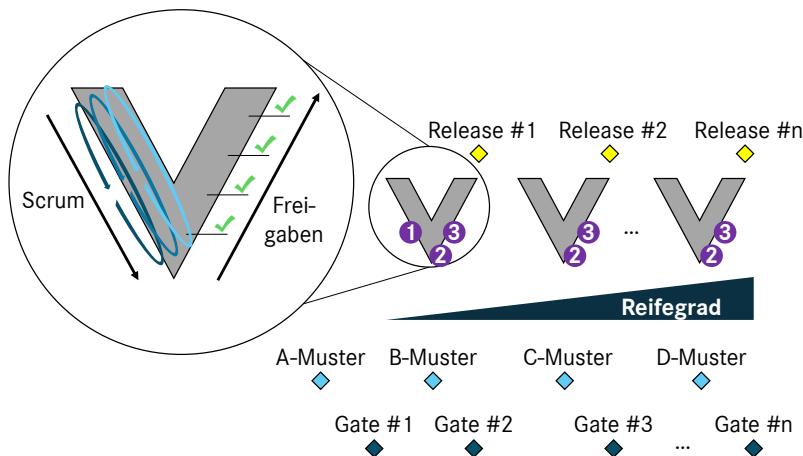
Ein Vergleich zwischen V-Modell und agilen Methoden findet sich z. B. in [34]. Die Anwendung agiler Methoden auf Organisationsebene bietet z. B. das Rahmenwerk Scaled Agile Framework (SAFe) [38].

### **2.3.3 Exemplarischer Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie**

Nachfolgend wird der exemplarische Entwicklungsprozess für Fahrerassistenzsystemen und automatisierte Fahrfunktionen nach Reisgys et al. [213] vorgestellt (vgl. Abb. 2.3). Darin werden etablierte Vorgehensmodelle mit agilen Entwicklungsmethoden kombiniert. Damit werden einerseits eine schnelle Anpassungsfähigkeit bei einer Änderung der Projektziele erreicht und gleichzeitig bestehende und für die Systemfreigabe bewährte Qualitäts- und Entwicklungsprozesse fortgeführt.

Kombiniert werden im Prozess das Stage-Gate-Modell [39] mit den zugehörigen Qualitätsgates sowie den Musterständen vom A- bis D-Muster [40]. Basierend auf dem Stage-Gate-Modell [39] wird am Ende jeder Stage eine „Go/Kill“-Entscheidung über die Fortsetzung oder Einstellung des Projekts getroffen.

Diese Entscheidung wird als Gate oder auch Quality-Gate bezeichnet. Entlang des steigenden Reifegrads der Musterstände und Qualitätsgates erfolgt ein wiederholtes Durchlaufen des V-Modells mit anschließenden Systemfreigaben.



**Abbildung 2.3:** Exemplarischer Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie [213]

Der linke Ast des V-Modells umfasst die Implementierung der Softwarekomponenten und Units in einer agilen Arbeitsweise nach Scrum. Der rechte Ast des V-Modells durchläuft die etablierten Verifikationsschritte des V-Modells [213]. Zusätzlich eingezeichnet sind die drei Prozessschritte Softwareanforderungsanalyse (1), Verifikation Softwareeinheiten (2) und Softwareintegration und Integrationstests (3) des Automotive SPICE Modells als Beispiele für konkrete Design- und Verifikationsschritte auf Komponentenebene [26].

### 2.3.4 Verifikation und Validierung

Im Folgenden werden die Begriffe Verifikation und Validierung nach Schäufele und Zurawaka [41] definiert.

**Definition Verifikation:** *Verifikation ist der Prozess zur Beurteilung eines Systems oder einer Komponente mit dem Ziel festzustellen, ob die Resultate einer gegebenen Entwicklungsphase den Vorgaben für diese Phase entsprechen. Software-Verifikation ist demnach die Prüfung, ob eine Implementierung der für den betreffenden Entwicklungsschritt vorgegebenen Spezifikation genügt.*

**Definition Validierung:** *Validierung ist der Prozess zur Beurteilung eines Systems oder einer Komponente mit dem Ziel festzustellen, ob der Einsatzzweck oder die Benutzererwartungen erfüllt werden. Funktionsvalidierung ist demnach die Prüfung, ob die Spezifikation die Benutzeranforderungen erfüllt, ob überhaupt die Benutzerakzeptanz durch eine Funktion erreicht wird.*

Als Bestandteil der Verifikation und Validierung werden Tests eingesetzt, um die Erfüllung der Spezifikation bei der Verifikation und der Benutzeranforderungen bei der Validierung zu überprüfen. Nach [42] ergibt sich die Definition des Begriffs Testen als:

**Definition Testen:** *Das Testen bezeichnet eine Aktivität, bei der ein System oder eine Komponente unter spezifizierten Bedingungen ausgeführt wird, die Ergebnisse beobachtet oder aufgezeichnet werden und eine Bewertung eines Aspekts des Systems oder der Komponente erfolgt.*

Basierend auf den eingeführten Definitionen werden nachfolgend die Herausforderungen bei der Verifikation und Validierung automatisierter Fahrfunktionen mit den vorgestellten Entwicklungsprozessen untersucht. Insbesondere Systeme nach SAE-Level 4 und 5 stehen einem Open World Problem gegenüber [43]. Dieses ergibt sich aus dem unstrukturierten Umfeld, das durch die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern und der Umwelt entsteht.

Dabei müssen alle möglichen Situationen berücksichtigt und besonderer Fokus in frühen Entwicklungsphasen auf sicherheitsrelevante Situationen gelegt werden [44].

Zusätzlich werden zentrale Begriffe aus den Standards ISO 26262 und ISO 21448 (Safety of the intended functionality (SOTIF)) eingeführt, die im Rahmen einer Verifikation und Validierung notwendig sind.

**Definition Risiko:** *Kombination aus der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts und der Schwere des Schadens* [25].

**Definition Unangemessenes Risiko:** *Als nicht akzeptabel bewertetes Risiko in einem bestimmten Kontext basierend auf validen gesellschaftlich moralischen Konzepten (engl. unreasonable risk)* [25].

**Definition Akzeptanzkriterium:** *Kriterium zur Bestimmung der Abwesenheit von unangemessenem Risiko* [45].

**Definition Restrisiko:** *Verbleibendes Risiko nach Anwendung von Sicherheitsmaßnahmen (engl. residual risk)* [25].

Weiterhin werden zwei für diese Dissertation zentrale Begriffe definiert.

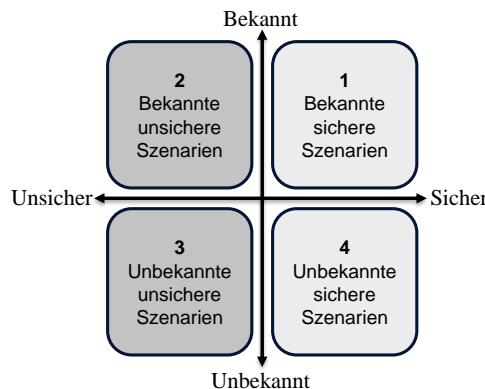
**Definition Sicherheitsargumentation:** *Argumentation zum Nachweis, dass das System kein unangemessenes Risiko darstellt* [45].

Hierzu werden Akzeptanzkriterien verwendet, mit denen das verbleibende Restrisiko bewertet wird.

**Definition Freigabeargumentation:** *Argumentation zum Nachweis, dass das System alle notwendigen Anforderungen zur Produktfreigabe erfüllt.*

Gemäß der Definition bildet die Sicherheitsargumentation den zentralen Teil der Freigabeargumentation. Zusätzlich zur Sicherheitsargumentation umfasst die Freigabeargumentation nicht sicherheitsrelevante Anforderungen, wie z. B. Zuverlässigkeit, Komfort oder Spritverbrauch.

Als Teil der Sicherheitsargumentation in ISO 21448 [45] werden Verkehrsszenarien basierend auf den Bewertungsebenen „bekannt“ bzw. „unbekannt“ (engl. known/unknown) sowie „Sicher“ bzw. „Unsicher“ (engl. hazardous/not hazardous) klassifiziert.<sup>1</sup> Daraus resultieren vier Quadranten, die bekannte und unbekannte sowie bekannte und unbekannte sichere Szenarien einteilen. Die zuvor vorgestellten Vorgehensmodelle decken über anforderungsbasierte Testmethoden nur die beiden Bereiche der bekannten Risiken und Situationen ab, da eine vollständige Spezifikation der Situationen vorliegen muss, um eine ausreichende Testabdeckung sicherzustellen [47]. Die in ISO 21448 definierten Aktivitäten zielen auf die Reduzierung von unbekannten sowie unsicheren Szenarien für eine Freigabe ab. Dies entspricht der dargestellten Minimierung von Bereich 3 in Abb. 2.4.



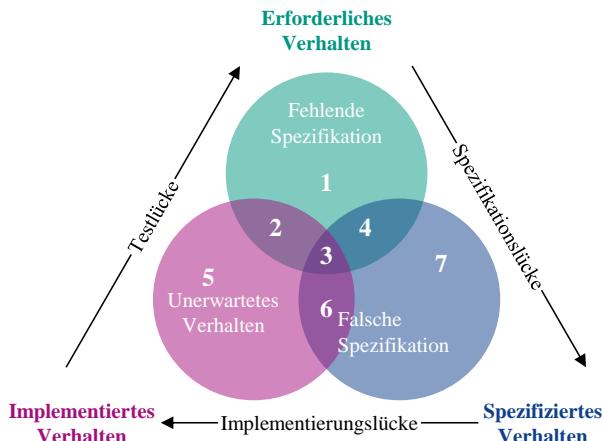
**Abbildung 2.4:** Entwicklung der Szenarienkategorien resultierend aus den Aktivitäten der ISO 21448 [45]

Ausgehend von dieser Problemstellung untersuchen Stellet et al. [48] das Zusammenspiel von Spezifikation, Verifikation und Validierung im Open World Kontext. Unterschieden wird zwischen dem erforderlichen, spezifizierten und implementierten Verhalten, wobei das Verhalten die Interaktion des Systems

<sup>1</sup> In der Publicly Available Specification (PAS) der Norm ISO PAS 21448:2019 [46] wird „unsafe“ statt „hazardous“ als Bezeichnung verwendet und hier mit sicher bzw. unsicher übersetzt.

mit der Umgebung bezeichnet. Das erforderliche Verhalten zur Erfüllung eines sicheren und validen Systems entspricht der „required function“ nach ISO 26262. Mit der Definition formalisierter Anforderungen wird das spezifizierte Verhalten gebildet, analog zur „intended functionality“ aus ISO 26262 und ISO 21448 (SOTIF) [45]. Das implementierte Verhalten wird durch die Realisierung des Systems erreicht und entspricht dem „implemented behavior of the intended functionality“ nach ISO 21448 [48].

Das mögliche Verhältnis zwischen den drei Verhalten im 3-Kreis-Modell zeigt Abb. 2.5. Aus einer Abweichung zwischen erforderlichem und spezifiziertem Verhalten ergibt sich eine Spezifikationslücke, z. B. bei unvollständigen oder fehlerhaften Annahmen über mögliche Betriebsbedingungen. Die Abweichung von spezifiziertem und implementiertem Verhalten wird als Implementierungslücke bezeichnet, die z. B. bei einem Einsatz des Systems in einem nicht spezifizierten Kontext entstehen [48]. Eine unzureichende Erfüllung des erforderlichen Verhaltens durch das implementierte Verhalten bezeichnen Stelle et al. als Testlücke, die insbesondere durch unzutreffende oder nicht mehr gültige Annahmen entstehen kann.



**Abbildung 2.5:** Vergleich zwischen erforderlichem, spezifiziertem und implementiertem Verhalten [48]

Die Verifikation überprüft die Abweichung zwischen spezifiziertem und implementiertem Verhalten und adressiert die Implementierungslücke. Die Validierung der Spezifikation vergleicht das erforderliche mit dem spezifizierten Verhalten und zielt so auf die Spezifikationslücke ab. Die Validierung der Implementierung zielt auf die Abweichung zwischen erforderlichem und implementiertem Verhalten und damit auf die Testlücke [49].

Tabelle 2.2 bezeichnet die sieben Flächen, die sich als Schnittmengen bei einer Abweichung zwischen den drei Verhalten ergeben.

**Tabelle 2.2:** Beschreibung der Flächen aus Abb. 2.5

Fläche	Bedeutung
1	Fehlende Spezifikation des erforderlichen Verhaltens
2	Robustes, nicht-spezifiziertes Verhalten
3	Implementierung verhält sich wie erforderlich
4	Fehlende Implementierung der korrekten Spezifikation
5	Unerwartetes, falsches Verhalten
6	Falsche Spezifikation oder technische Limitierung
7	Fehlende Implementierung von falscher Spezifikation

In [49] wird untersucht, für welche Bereiche aus Abb. 2.5 durch simulative Methoden Nachweise für die Validierung erbracht werden können. Außerdem werden Voraussetzungen herausgestellt, die für eine valide Aussage der Simulationen notwendig sind.

Stelle et al. [48] folgern, dass durch die Kombination der Standards ISO 26262 und ISO 21448 die Spezifikations- und Implementierungslücke explizit adressiert wird. Die Rolle von getroffenen Annahmen wird hingegen nicht durch die Standards reguliert. Daher wird ein Algorithmus vorgeschlagen, mit dem die getroffenen Annahmen mit den Validierungsaktivitäten in Einklang gebracht werden sollen. Ziel des Algorithmus ist, verletzte oder fehlerhafte Annahmen zu identifizieren.

## 2.4 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend liefert ISO 21448 lediglich ein Rahmenwerk für die Argumentation der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos (SOTIF), jedoch keine konkrete oder etablierte Umsetzung wie es bei ISO 26262 der Fall ist.

Daher existiert in Industrie und Wissenschaft kein etablierter Ansatz, welche Nachweise für die Abwesenheit eines unangemessenen Risikos im Open World Kontext für hochautomatisierte Fahrzeuge (SAE-Level 4) notwendig sind und wie diese in den Test- und Freigabeprozess integriert werden können [50], [51].

# **3 Stand der Technik und Forschung für Test und Freigabe automatisierter Fahrzeuge**

## **3.1 Testmethoden in der Automobilindustrie**

Für die Durchführung von Tests zur Überprüfung von Anforderungen als Teil der Verifikation kommen verschiedene Testmethoden zum Einsatz. Basierend auf der Definition des Testens (vgl. Abschnitt 2.3.4) wird zuerst die Bezeichnung des Testobjekts oder SuT definiert:

**Definition Testobjekt:** *Das Testobjekt bzw. das SuT ist die zu testende Einheit [8].*

Ausgehend vom untersuchten SuT muss bei der Testplanung eine geeignete Testumgebung gewählt werden. In der Automobilindustrie eingesetzte Testmethoden und die zugehörigen Testumgebungen werden im Folgenden vorgestellt.

### **3.1.1 Realer Fahrversuch**

Eine bewährte Methode in der Automobilindustrie ist die physische Fahrerprobung. Hier kommen Prototypen oder Vorserienfahrzeuge zum Einsatz und werden unter realen Bedingungen getestet. Als Vorteil ist keine Modellbildung erforderlich, da das System während der Tests realen Umgebungsbedingungen ausgesetzt ist [28]. Nachteilig sind eine geringe Flexibilität sowie hohe Kosten, die bei der Entwicklung und Produktion von Prototypen entstehen

[52]. Außerdem sind Prototypen häufig in frühen Entwicklungsphasen noch nicht verfügbar (vgl. Abschnitt 2.3.3). Beim realen Fahrversuch handelt es sich um eine streckenbasierte Testmethode, die in Tests im realen Straßenverkehr oder auf dem Prüfgelände unterteilt werden kann [13]. Möglich ist auch die Breitenerprobung im Kundeneinsatz, bei der Fahrzeuge ausgewählten Kunden zum Test im beabsichtigten Einsatzgebiet bereitgestellt werden [16].

### 3.1.2 Simulationsbasierte Tests

Eine der Methoden, die in der Automobilentwicklung am meisten an Bedeutung gewonnen haben, ist die Simulation bzw. virtuelle Entwicklung [31]. Als erste Anwendungen kamen z. B. dreidimensionale Strömungssimulationen (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) und Finite-Elemente-Methoden zur Festigkeitsberechnung zum Einsatz. Für die Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen spielt insbesondere die Simulation vielfältiger Verkehrsszenarien eine Rolle, um die Planungssoftware im Rahmen einer virtuellen Erprobung schnell und iterativ zu testen. Auf den szenarienbasierten Testansatz wird in Abschnitt 3.2 detailliert eingegangen. Ein weiteres zentrales Anwendungsgebiet ist die Sensorsimulation, bei der anhand von Sensormodellen künstliche Sensordaten erzeugt werden [53]. Andere Funktionen eines automatisierten Fahrzeugs, wie die Lokalisierung und Informationsfusion, können in speziellen Simulationsansätzen modelliert oder mit der Simulation weiterer Funktionen kombiniert werden [54].

### 3.1.3 X-in-the-Loop Tests

Eine wesentliche Unterscheidung von Simulationsmethoden kann zwischen Closed-Loop und Open-Loop Simulationen vorgenommen werden.

Bei der Closed-Loop Simulation werden zuerst künstliche Eingangsdaten für das SuT durch ein Umgebungsmodell erzeugt. Der Aufbau des SuT wird dabei über die funktionalen Schichten des Sense-Plan-Act Prinzips nach Brooks [55] dargestellt. Die Reaktion des SuT wird über die Ausgangsdaten erfasst und bei der Generierung der Eingangsdaten für den nächsten Simulationsschritt

berücksichtigt [31]. Dieses Feedback ist insbesondere für die Untersuchung von Systemen aus den funktionalen Ebenen „Plan“, wie der Verhaltens- und Planungssoftware, sowie der Quer- und Längsregelung aus der Ebene „Act“ eines automatisierten Fahrzeugs notwendig.

Beim Open-Loop Ansatz wird kein Feedback des Systems für die Erzeugung der Eingangsdaten verwendet, sondern dem System reale oder künstliche Eingangsdaten vorgegeben. Abschließend wird der Abgleich des Systemausgangs mit der zu erwarteten Reaktion durchgeführt. Dieser Ansatz wird insbesondere für rechenintensive Simulationen von Systemen der Ebene „Sense“ eingesetzt, z. B. für die Sensorsimulation [30]. Beim Open-Loop Ansatz besteht die Möglichkeit, reale Messdaten direkt als Systemeingang vorzugeben, wie z. B. Sensorrohdaten von Radar- und Lidarsensoren oder Kamerabildern. Dies ist bei Closed-Loop Ansätzen für die Sensorsimulation nur eingeschränkt möglich, da eine Veränderung der Messdaten in Echtzeit als Reaktion auf das Fahrzeugverhalten einen enormen Rechenaufwand hervorruft [53]. Für die Verifikation und Validierung von ACC-Systemen eines Fahrzeugs verwendet Bach den Ansatz des Reactive Replays [16]. Durch die Projektion von aufgezeichneten zeitbasierten Fahrdaten auf die Fahrstrecke wird die Einbindung von Realdaten in die Closed-Loop Simulation ermöglicht.

Als Referenz für den Aufbau von Xil-Umgebungen wird die Darstellung nach [213] verwendet (vgl. Abb. 3.1). Die funktionalen Schichten des SuT sind dabei nach dem Sense-Plan-Act Prinzip nach Brooks [55] unterteilt.

### **3.1.3.1 Model-in-the-Loop (MiL) und Software-in-the-Loop (SiL)**

Während bei MiL-Methoden das SuT als vereinfachtes Modell vorliegt, wird beim SiL-Test reale Software als SuT verwendet und in Testumgebungen ausgeführt [16]. In der Entwicklung nach dem V-Modell (vgl. Abschnitt 2.3.1) kommen beide Ansätze in der Entwicklungsphase im Rahmen von Modultests, Komponenten- oder Subsystemtests sowie Softwareintegrationstests zum Einsatz [8].

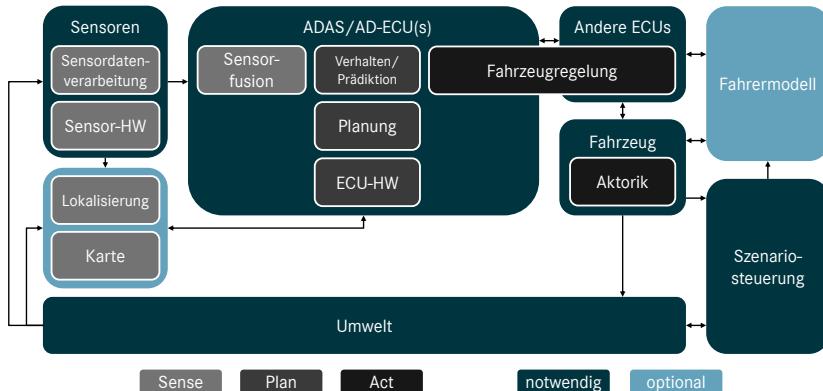


Abbildung 3.1: X-in-the-Loop (XiL)-Aufbau für den Test automatisierter Fahrzeuge [213]

Für die Absicherung automatisierter Fahrzeuge nimmt die Bedeutung von SiL-Tests deutlich zu, da für wesentliche Umfänge der Verifikation und Validierung in Form des szenarienbasierten Testens SiL-Simulationen zum Einsatz kommen [56].

Im Rahmen dieser Dissertation wird vor allem der Einsatz von SiL-Umgebungen betrachtet, die anhand des in Abb. 3.1 gezeigten Aufbaus nachfolgend beschrieben werden. Dabei wird als SuT zum Test des funktionalen Verhaltens automatisierter Fahrzeuge die Verhaltens- und Planungssoftware (engl. Behavior and Planning) sowie die Fahrzeugregelung (engl. Motion Control) in eine Simulationsumgebung eingebunden, wie sie auch auf dem Steuergerät des automatisierten Fahrzeugs zum Einsatz kommt. Für die peripheren Komponenten mit Schnittstellen zum SuT werden Modelle entwickelt, um einen Betrieb analog zum späteren Einsatz im Gesamtsystem abzubilden.

In der Simulationsumgebung werden das Fahrzeugmodell sowie die Umgebungsmodellierung umgesetzt. Die einzelnen Komponenten werden z. B. in Docker-Containern ausgeführt, die alle zum Ausführen notwendigen Abhängigkeiten enthalten und daher systemunabhängig ausgeführt werden können. Die Simulation erfolgt nicht auf der Zielhardware wie bei einem Hardware-in-the-Loop (HiL)-Ansatz, sondern auf einem Laptop, einer Workstation oder

in einer Cloudumgebung. Die einzelnen Komponenten kommunizieren über eine Middleware, wofür z. B. das Robot Operating System (ROS) zum Einsatz kommt<sup>1</sup>. Das Fahrzeugmodell inklusive der Modellierung der Aktorik ersetzt das reale Fahrzeug und bildet die Längs- und Querdynamik als Reaktion auf die Vorgaben der Bewegungsregelung ab. Anhand dieses Fahrdynamikmodells wird die Veränderung des Fahrzeugzustands in jedem Simulationsschritt berechnet und für den Zustand des Ego-Fahrzeugs im Umgebungsmodell berücksichtigt. Der Fokus der Umgebungsmodellierung liegt auf der Abbildung der Straße und der Verkehrsobjekte. Die notwendigen Informationen werden der Simulationsumgebung über eine Karte und die Szenarienbeschreibung bereitgestellt.

### 3.1.3.2 HiL

Liegt die Zielhardware in Form eines realen Steuergeräts vor, kann ein HiL Ansatz realisiert werden. Dies ist für Regler- und Steuergerätealgorithmen ein zentraler Bestandteil in der Entwicklung und Verifikation nach dem V-Modell (vgl. Abschnitt 2.3) [8]. Eingesetzt wird der HiL-Test primär für Komponenten- und System- sowie Subsystem-Integrationstests (vgl. Abschnitt 2.3.1). Bezogen auf Abb. 3.1, kann ein HiL-Aufbau durch Einbindung des Steuergeräts bzw. der Electronic Control Unit (ECU) als Zielhardware realisiert werden, auf der die Verhaltens- und Planungssoftware der automatisierten Fahrfunktionen ausgeführt wird. Als zusätzliche Hardware kann z. B. die reale Kamera verwendet werden, die in einer abgeschirmten Box einen Bildschirm mit einer Umgebungsmodellierung filmt. Zusammen mit einem Radarmodell stellt dies ein typisches HiL-Setup für den Test von Notbremsassistenten oder ACC-Systemen dar [57]. Vorteil des HiL ist die kostengünstigere Erprobung auf der Zielhardware im Vergleich zum Einsatz eines Fahrzeugtests. Nachteilig ist aufgrund der detaillierten und echtzeitfähigen Abbildung der Umgebungskomponenten der höhere erforderliche Modellierungsaufwand gegenüber SiL-Tests [58].

---

<sup>1</sup> <https://www.ros.org>

### 3.1.3.3 Driver-in-the-Loop (DiL)

DiL-Verfahren werden primär für die Untersuchung des Fahrerverhaltens in Simulatorstudien eingesetzt. Damit kann die Interaktion des Menschen mit dem Fahrzeug und Fahrerassistenzsystemen getestet werden [16]. Relevant ist dies z. B. für Systeme mit SAE-Level 3, bei denen der Fahrer die Fahrzeugführung in einer bestimmten Zeitspanne übernehmen muss, wenn das System dies anfordert [5]. Ein Beispiel für ein solches System ist in Abb. 3.2 abgebildet.



Abbildung 3.2: Dynamischer Fahrsimulator (Mercedes-Benz) [59]

Zusätzlich existiert die Testmethode Vehicle-in-the-Loop (ViL), bei der dem Fahrer unter Verwendung einer Videobrille über Verfahren der Augmented Reality in einem echten Fahrzeug ein dreidimensionales Bild mit der realen Umgebung überlagert wird [11].

## 3.2 Szenarienbasiertes Testen

Für die Entwicklung und Freigabe automatisierter Fahrzeuge existiert eine unbegrenzte Anzahl von möglichen Verkehrssituationen [7]. Diese entstehen durch die Kombination verschiedener Elemente wie dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, dem Straßennetz oder den Umgebungsbedingungen. Da deren Abdeckung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht allein mit realen Testfahrten möglich ist, wurde im Gegensatz zu distanzbasierten

Methoden eine szenarienbasierte Testmethode entwickelt. Bei diesem Ansatz werden Verkehrssituationen in einzelne definierte Szenarien unterteilt, um den Testraum zu strukturieren. Diese Szenarien werden insbesondere mit simulativen XiL-Methoden getestet [213]. Ziel der Methode ist, systematisch Szenarien zu entwickeln, mit denen ein strukturierter Test innerhalb der ODD möglich wird [28].

Nachfolgend werden für eine eindeutige Unterscheidung grundlegende Begriffe eingeführt, die im „Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen (PEGASUS)“ [60] für den Test von SAE-Level 3 Fahrzeugen entwickelt wurden. Dabei handelt es sich um ein vom BMWi gefördertes Forschungsprojekt, das im Juni 2019 abgeschlossen wurde [61].

Ein Vergleich der Begriffe Szene, Situation und Szenario wurde von Ulbrich et al. [62] durchgeführt. Die darin vorgeschlagenen einheitlichen Definitionen bilden eine zentrale Grundlage des szenarienbasierten Testens.

**Definition Szenario:** *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 [62].*

Demnach besteht ein Szenario aus mindestens einer initialen Szene. Durch Aktionen und Ereignisse werden Szenen zu einem Szenario verknüpft. Zu einem Szenario gehören die Elemente Ego-Fahrzeug, Verkehrsteilnehmer sowie Umwelt [63]. Als Ego-Fahrzeug wird das untersuchte Fahrzeug bezeichnet [64]. Als zentrales Element von Szenarien wird nachfolgend der Szenenbegriff eingeführt.

Nach Reschka [65] wird eine **Szene** definiert als:

**Definition Szene:** *Eine Szene beschreibt eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die beweglichen und unbeweglichen Elemente*

*des Umfelds, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter und die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst [...] [65].*

Eine umfassende Repräsentation einer Szene ist lediglich in der Simulation möglich, was als objektive Szene oder Ground Truth bezeichnet wird. Bei realen bzw. subjektiven Szenen ist die Repräsentation stets „unvollständig, fehlerbehaftet [und] unsicherheitsbehaftet“ [62] sowie von der Sicht der Beobachter abhängig. Den schematischen Zusammenhang zwischen Szenen und Szenarien zeigt Abb. 3.3.

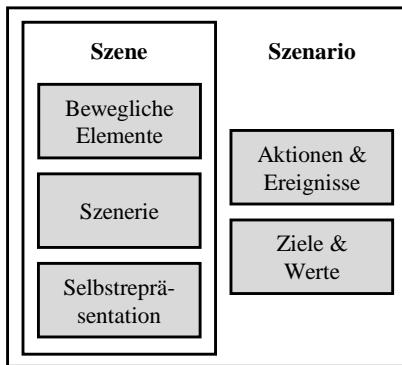


Abbildung 3.3: Darstellung von Szene und Szenario nach [62]

Zuletzt wird die Definition einer **Situation** nach Reschka und Ulbrich eingeführt:

**Definition Situation:** Eine Situation beschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind. 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 [65].

Zwischen einer Szene und einer Situation bestehen große Gemeinsamkeiten. Der zentrale Unterschied ist, dass eine Situation die subjektive Sicht lediglich eines einzelnen Teilnehmers berücksichtigt. Zusätzlich erfolgt die Einbeziehung der Ziele und Werte des Teilnehmers. Dies kann z.B. die unterschiedliche Bewertung der Relevanz eines Fußgängers gegenüber statischen Hindernissen umfassen.

Ein zentraler Begriff zur Beschreibung des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern in Szenarien ist das Manöver. Pfeffer vergleicht in [28] verschiedene Konzepte für Manöver und führt zur Präzisierung des Begriffs folgende Definition ein:

**Definition Manöver:** *Ein Manöver ist die Abstraktion des Verhaltens eines Verkehrsteilnehmers zwischen zwei stationären Zuständen, Szenen oder Beziehungen. Je nach Abstraktionsgrad kann zwischen „atomaren Manövern“, „Basismanövern“ oder „Kompositionsmäövern“ unterschieden werden [28].*

Die atomaren Manöver stellen die niedrigste Abstraktionsebene dar und beschreiben grundsätzliche Aktionen der Längs- und Querführung, z.B. die Gaspedalstellung. Auf mittlerem Abstraktionsgrad sind Basismanöver „Grundeinheiten der Aktionen zur Längs- und Querführung“ [28], z.B. „Fahrstreifen folgen“, „Fahrstreifenwechsel links“ oder „Zielgeschwindigkeit erhöhen“ für einen Autobahnpilot. Kompositionsmäöver werden aus Basismanövern zusammengesetzt und können auch die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern beschreiben, wie das Überholen oder Einfädeln in den Verkehr.

### 3.2.1 Abstraktionsebenen für Szenarien

#### 3.2.1.1 Funktionale, logische und konkrete Szenarien

Aufbauend auf der Szenariendefinition nach [62] wurde im PEGASUS-Projekt eine Unterteilung von Szenarien in drei Abstraktionsebenen entwickelt. Bag schik et al. schlagen in [66] die Unterscheidung in funktionale, logische und

konkrete Szenarien vor. Ziel des Ansatzes ist eine kontinuierliche Überführbarkeit der Szenarien innerhalb des Entwicklungsprozesses nach der Norm ISO 26262.

- 1. Funktionale Szenarien** bezeichnen die semantischen Beschreibungen der Betriebsszenarien des Systems in der Konzeptphase. Bedingung hierfür ist eine widerspruchsfreie und intuitiv lesbare Darstellung der Bestandteile des Szenarios sowie der Beziehungen zwischen den Bestandteilen.
- 2. Logische Szenarien** stellen die nächste Detaillierungsebene dar. Durch die Überführung der funktionalen Szenarien anhand von Parametern und Parameterbereichen entsteht eine formale Szenarienbeschreibung. Die Bestandteile und Beziehungen zwischen den Bestandteilen können zudem über statistische Verteilungen sowie Korrelationen zwischen den Parametern beschrieben werden.
- 3. Konkrete Szenarien** werden aus logischen Szenarien durch die Festlegung spezifischer Werte der Parameter innerhalb der Parameterbereiche abgeleitet. Damit ergibt sich eine eindeutige Szenarienbeschreibung, die in einen Testfall überführt werden kann.

Abb. 3.4 zeigt eine Übersicht der drei Abstraktionsebenen.

Funktionale Szenarien	Logische Szenarien	Konkrete Szenarien
Basisstrecke: 3- streifige Autobahn in Kurve Begrenzung auf 100 km/h durch Verkehrszeichen rechts und links	Basisstrecke: Breite Fahrstreifen [2,3..3,5] m Kurvenradius [0,6..0,9] km Pos_Verkerszeichen [0..200] m	Basisstrecke: Breite Fahrstreifen [3,2] m Kurvenradius [0,7] km Pos_Verkerszeichen [150] m
Stationäre Objekte: -	Stationäre Objekte: -	Stationäre Objekte: -
Bewegliche Objekte: Ego, Stau; Interaktion: Ego in Manöver „Annähern“ auf mittleren Fahrstreifen, Stau zähfließend	Bewegliche Objekte: Stauende_Pos [10..200] m Stau_Geschw. [0..30] km/h Ego_Abstand [50..300] m Ego_Geschw. [80..130] km/h	Bewegliche Objekte: Stauende_Pos 40 m Stau_Geschw. 30 km/h Ego_Abstand 200 m Ego_Geschw. 100 km/h
Umwelt: Sommer, Regen	Umwelt: Temperatur [10..40] °C Tröpfchengröße [20..100] µm	Umwelt: Temperatur 20 °C Tröpfchengröße 30 µm

Abbildung 3.4: Funktionale, logische und konkrete Szenarien nach [66]

Diese sind am Beispiel der Fahrt auf einer Autobahn und der Annäherung des Ego-Fahrzeugs an ein Stauende dargestellt. Der Detaillierungsgrad steigt mit der Anzahl an Szenarien von den funktionalen hin zu den konkreten Szenarien. Aus einem logischen Szenario kann mindestens ein konkretes Szenario abgeleitet werden. Liegen Parameterbereiche vor, können durch diskrete Abtastung des Parameterraums unbegrenzt viele konkrete Szenarien aus einem logischen Szenario abgeleitet werden [66].

### 3.2.1.2 Abstrakte Szenarien

Neurohr et al. schlagen in [67] den Begriff abstrakte Szenarien als vierte Abstraktionsebene vor (vgl. Abb. 3.5).

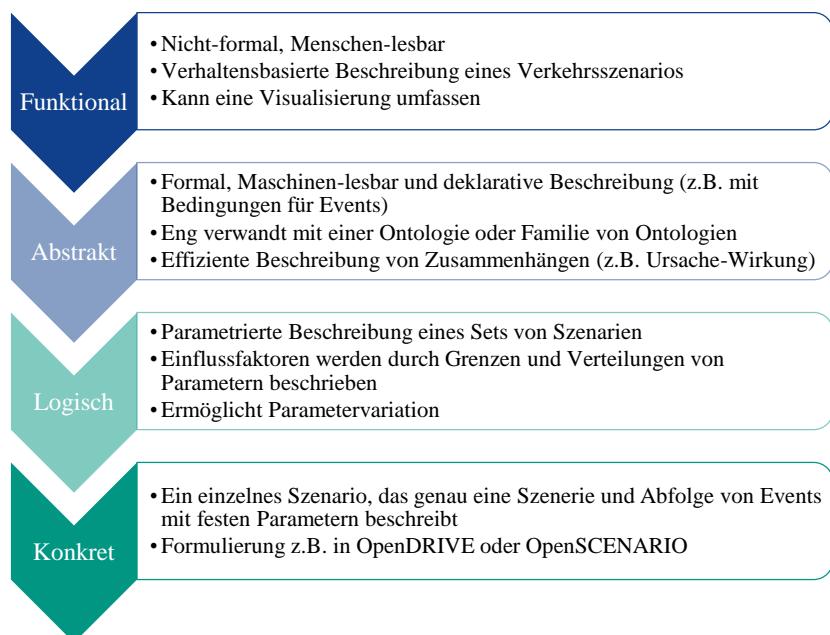


Abbildung 3.5: Abstraktionsebenen von Szenarien nach [67]

Diese unterscheiden sich von funktionalen Szenarien durch eine maschinenlesbare und formalisierte Beschreibung. Als Abgrenzung zu logischen Szenarien muss nicht jeder Parameter explizit definiert sein. Stattdessen wird das abstrakte Szenario anhand von Beziehungen und Bedingungen basierend auf einer Ontologie beschrieben. Als mögliche Beschreibung der Szenarien werden Traffic Sequence Charts und Zonendiagramme genannt [67].

### 3.2.1.3 Szenariensprachen

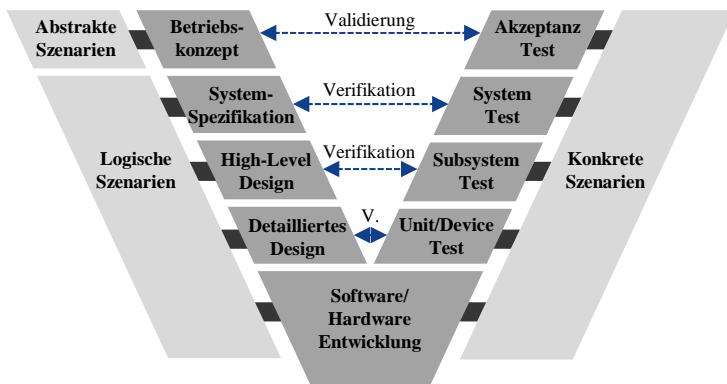
Im Standard **OpenSCENARIO DSL** der Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (ASAM) finden abstrakte Szenarien bereits Anwendung [68]. Dieser integriert grundlegende Konzepte der Measurable Scenario Description Language (M-SDL) von Foretellix [69] und erlaubt die Modellierung von dynamischen Verkehrsteilnehmern, die auch als Akteuren bezeichnet werden. Die abstrakten Szenarien sind maschinen- und menschenlesbar sowie sind in der Lage, Beziehungen zwischen Entitäten durch Bedingungen (engl. Constraints) zu beschreiben. Diese abstrakte Szenarienbeschreibung erlaubt es, Szenarien auch ohne Festlegung aller konkreten Parameterwerte innerhalb der definierten Bedingungen zu generieren.

Den Vorgänger des Standards bildet **OpenSCENARIO XML** [70]. Dieser verwendet das Format Extensible Markup Language (XML), während der Standard OpenSCENARIO DSL eine eigene Programmiersprache darstellt. Szenarien werden hierarchisch basierend auf einem als Storyboard bezeichneten Ablauf definiert, der in die Bestandteile Story, Act und Sequence unterteilt wird. Damit können sowohl exakte Trajektorien aus aufgezeichneten Daten abgebildet als auch Szenarien basierend auf Manövern beschrieben werden.

Zusätzlich existiert der Standard **OpenDRIVE** [71] für die Beschreibung von Straßennetzen. Dieser ist ebenfalls im XML-Format definiert und beinhaltet die Straßengeometrie, Spuren, statische Objekte wie Fahrspurmarkierungen sowie Verkehrsschilder und Signale.

### 3.2.1.4 Szenarien im Entwicklungsprozess

Die Einordnung der Szenarien in den Entwicklungsprozess nach dem V-Modell (vgl. Abschnitt 2.3.1) zeigt Abb. 3.6.



**Abbildung 3.6:** Einordnung von abstrakten, logischen und konkreten Szenarien in den Entwicklungsprozess nach dem V-Modell nach [72]

Basierend auf der Einordnung von Bagschik et al. [66] schlagen Bock et al. [72] die Umbenennung der funktionalen in abstrakte Szenarien für die Einbindung in das V-Modell vor. Damit soll herausgestellt werden, dass zum Zeitpunkt der Definition des Betriebskonzepts und der Anforderungsanalyse das Zielsystem und dessen (funktionale) Systemspezifikation noch nicht definiert sind [13].

### 3.2.2 Ebenen-Modell zur Beschreibung der ODD

Im Rahmen des PEGASUS-Projekts wurde eine systematische Beschreibung der ODD über ein Ebenen-Modell entwickelt, die sich auf Autobahn-Szenarien für ein System nach SAE-Level 3 konzentriert. Die von [30] vorgeschlagenen vier Ebenen wurden von Bagschik et al. in [73] und [74] um eine fünfte Ebene ergänzt. Hierzu wird die Ebene 3 für temporäre Modifikationen der Straßenebene (Ebene 1) und Verkehrsinfrastruktur (Ebene 2) eingeführt, die

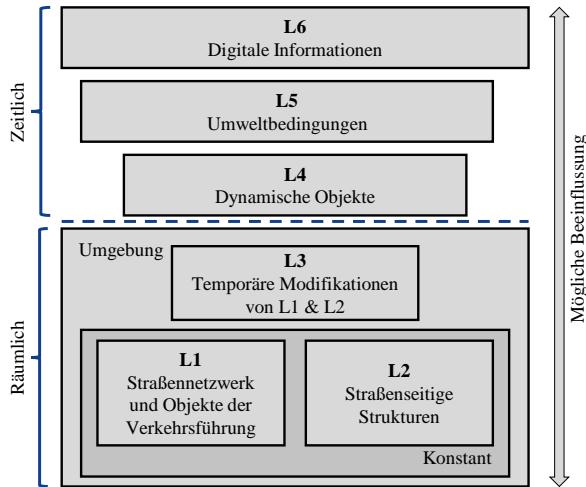
somit detaillierter unterschieden werden. Bock et al. [75] erweitern das Modell durch Berücksichtigung von digitalen Informationen zu einem 6-Ebenen Modell, das im Folgenden erläutert wird.

1. Die **Straßen-Ebene** umfasst die Geometrie und Topologie der Straße, z. B. die Breite und Anzahl der Fahrspuren und die Straßenkrümmung. Außerdem wird die Qualität und Begrenzung der Fahrbahn erfasst.
2. Die **Verkehrsinfrastruktur** umfasst alle statischen Elemente zur Vorgabe des zulässigen Verkehrsverhaltens, z. B. Schilder, Ampeln oder Markierungen.
3. **Zeitlich begrenzte Veränderungen** der Ebenen 1 und 2, insbesondere durch Baustellen oder z. B. Leitkegel zur Verkehrsführung nach einem Unfall.
4. **Ebene der beweglichen Objekte** und deren Beziehungen zueinander. Dies beinhaltet alle Verkehrsteilnehmer und deren Verhalten, z. B. Fahrzeuge, Personen, Fahrradfahrer oder Tiere.
5. Beschreibung von **Umweltbedingungen**, Wetter, Tageszeit und dem Einfluss auf die anderen Ebenen.
6. **Daten- und Kommunikationsebene**, in der Daten von Vehicle-to-X-Anwendungen oder digitalen Kartendaten bereitgestellt werden.

Die Definition der Entitäten der Ebenen erfolgt in einem systematischen Ansatz, der wissensbasierte und datenbasierte Methoden zur Identifikation der Elemente zulässt. Basierend auf den entwickelten Ebenen erfolgt ein systematischer Prozess zur Definition der Szenarien [75].

Im Rahmen des Verifikations- und Validierungsmethoden automatisierter Fahrzeuge im urbanen Umfeld (VVM)-Projekts haben Scholtes et al. [76] das 6-Ebenen Modell für die Beschreibung von urbanen Umgebungen weiterentwickelt (vgl. Abb. 3.7). Eingeführt wird die Trennung in eine räumliche Beschreibung auf den Ebenen 1 bis 3 sowie eine zeitliche Beschreibung auf den Ebenen 4 bis 6. Entitäten der Ebenen 1 bis 3 sind über die Dauer eines Szenarios konstant, während sich die Entitäten der Ebenen 4 bis 6 innerhalb

eines Szenarios ändern können [76]. Diese Unterscheidung ist konsistent mit den Definitionen der Formate OpenSCENARIO XML für Ebene 4 sowie OpenDRIVE für die Ebenen 1, 2 und 3 (vgl. Abschnitt 3.2.1.3).



**Abbildung 3.7:** 6-Ebenen Modell zur Beschreibung von urbanem Umfeld und Verkehr [76]

Zentraler Bestandteil des Modells ist die mögliche Beeinflussung zwischen allen Ebenen. Für eine in Ebene 3 definierte Baustelle ergibt sich z. B. eine Anpassung der Straßengeometrien und der Straßenbegrenzungen aus Ebene 1 und 2. Zusätzlich resultiert eine angepasste Modellierung des Verhaltens von dynamischen Verkehrsteilnehmern in Ebene 4 bei einer Reduzierung der Fahrspuren in einer Baustelle [77].

Ein Unterschied zum zuvor beschriebenen 6-Ebenen Modell nach [75] ist die Zuordnung der Verkehrsinfrastruktur und der zugrunde liegenden Verkehrsregeln zu Ebene 1 statt 2. Ebene 2 enthält nach [76] hingegen eine detaillierte Modellierung des Umfelds (z. B. Gebäude, Straßenbegrenzungen und Vegetation), da diese im urbanen Umfeld einen wesentlichen Einfluss haben, z. B. bei der Verdeckung anderer Fahrzeuge durch Gebäude an einer Kreuzung.

Im Modell soll eine eindeutige und strukturierte Zuordnung eine widerspruchsfreie Beschreibung sicherstellen. Die Trennung in räumliche und zeitliche Ebene führt dazu, dass Eigenschaften derselben Entitäten verschiedenen Ebenen zugeordnet werden. Nach Scholtes et al. werden z. B. Ampeln Ebene 1 zugeordnet, die Änderung des Zustands bei einer Schaltung der Ampel jedoch den digitalen Informationen in Ebene 6. Um Widersprüche zu vermeiden, werden in [76] acht Richtlinien für die Zuweisung von Entitäten zu den einzelnen Ebenen aufgestellt und an Beispielen erläutert.

Auf Basis des 6-Ebenen-Modells wurde im VVM-Projekt das OMEGA-Datenformat entwickelt [78]. Dieses ontologiebasierte Modell soll eine standardisierte Beschreibung sowohl von Referenzdaten (Ground Truth) als auch von Umfelderfassungsdaten der Sensorik ermöglichen.

### **3.2.3 Bewertung von Szenarien**

Neben den in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Abstraktionsebenen können Szenarien nach weiteren Kriterien unterteilt und bewertet werden. Die nachfolgend vorgestellten Methoden beziehen sich auf die Bewertung von konkreten Szenarien und Situationen. Aus der Bewertung einzelner konkreter Szenarien kann nicht direkt auf die Bewertung eines gesamten logischen Szenarios geschlossen werden, da z. B. eine Gefährdung nur in bestimmten Parameterbereichen vorliegen kann. Für die Bewertung von Szenarien mit höherem Abstraktionsgrad ist eine Aggregation der Einzelbewertungen der abgeleiteten konkreten Szenarien notwendig. Dies kann durch die Bestimmung der Repräsentativität und Abdeckung eines abstrakten oder logischen Szenarios durch eine begrenzte Anzahl konkreter Szenarien erfolgen. Diese Problemstellung ist Bestandteil aktueller Forschung und wird in Abschnitt 3.3.1 betrachtet.

#### **3.2.3.1 Relevante Szenarien**

Ponn et al. [54] führen eine Unterscheidung von Szenarien in relevante und kritische Szenarien ein. Alle Szenarien, die innerhalb der ODD des Systems zur Freigabe von automatisierten Fahrzeugen beitragen, werden als relevante

Szenarien beschrieben. Als Beispiel wird die Einhaltung einer Geschwindigkeitsbegrenzung genannt, da die Beachtung der Verkehrsregeln notwendig für die Zulassung eines automatisierten Fahrzeugs ist. Nicht relevante Szenarien folgen aus einer Beschränkung der ODD. Z. B. muss ein Autobahnpilot keine innerstädtische Kreuzung beherrschen, wodurch dieses Szenario als nicht relevant für die Absicherung eingestuft wird [18].

### 3.2.3.2 Kritische Szenarien

Eine Teilmenge der relevanten Szenarien stellen kritische Szenarien dar. In [54] wird als Kritikalitätsmaß die Nähe einer Kollision verwendet, die z. B. anhand der Metrik Time To Collision (TTC) beschrieben werden kann. Ein hohes Kritikalitätsmaß ergibt sich für einen niedrigen Wert der TTC. Dies kann aufgrund von hohen Differenzgeschwindigkeiten und geringen Abständen zwischen Objekten vorliegen. Kritische Szenarien können aus dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer sowie Fehlern und Limitierungen des Systems entstehen, wie der späten Erfassung von Objekten auf der Fahrbahn.

Nachfolgend wird auf die Bedeutung der Kritikalität eingegangen, die für die Entwicklung und Absicherung eines automatisierten Fahrzeugs eine entscheidende Rolle einnimmt. Im Rahmen des VVM-Projekts wird die Kritikalität als Maß zur strukturierten Identifikation der Risiken im Open World Kontext automatisierter Fahrzeuge eingeführt [67]. Neurohr et al. verwenden folgende Definition, mit der die Kritikalität von Verkehrssituationen beschrieben und für das automatisierte Fahren angewendet werden kann.

**Definition Kritikalität:** *Die Kritikalität (einer Verkehrssituation) ist das kombinierte Risiko der beteiligten Akteuren, wenn die Verkehrssituation fortgesetzt wird [67].*

Die Kritikalität ist bezogen auf alle Verkehrsteilnehmer definiert, um kritische Situationen sowohl aus Sicht des Ego-Fahrzeugs als auch der anderen Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen [43]. Durch den Bezug zur Verkehrssituation handelt es sich um die Kritikalität zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Für die Bewertung eines Szenarios ist die Erweiterung der Kritikalitätsdefinition auf eine Sequenz von Situationen notwendig. Stehen für die Bewertung Ground Truth Daten z. B. in XIL-Tests zur Verfügung, erhält man die Kritikalität einer Szene (vgl. Abschnitt 3.2).

### 3.2.3.3 Kritikalitätsmetriken

Der Definition der Kritikalität nach [67] folgend, führen Westhofen et al. in [43] eine Klassifikation von Kritikalitätsmetriken ein. Diese werden unterschieden in Metriken zur Bewertung von Szenen oder Szenarien. Szenarienmetriken können über eine Aggregation aus Szenenmetriken berechnet werden. Hierfür kann eine zeitliche Aggregation über alle Szenen innerhalb der Dauer eines Szenarios verwendet werden und z. B. der maximale Kritikalitätswert berechnet werden. Zusätzlich können Kritikalitätsmetriken über beliebige Akteure einer Szene aggregiert werden, um den kritischsten Akteur zu identifizieren [43]. Im Folgenden werden stets aggregierte Szenarienmetriken eingesetzt, bei denen die maximale Kritikalität über die Dauer des Szenarios und über alle beteiligten Akteure berechnet wird.

Eine weitere mögliche Unterteilung von Kritikalitätsmetriken in vier Kategorien nach der Charakteristik ihrer Berechnung wird in [79] vorgeschlagen:

1. *Vereinfachte Metriken*: Erlauben eine Einschätzung der Kritikalität basierend auf einfachen physikalischen Annahmen, z. B. TTC [10]
2. *Potentialbasierte Metriken*: Basierend auf der Potentialtheorie wird die Kritikalität als Objekte umgebendes Potential beschrieben, z. B. MerLin [79]
3. *Trajektorienbasierte Metriken*: Ausgehend von detaillierten Verhaltens- und Wahrscheinlichkeitsmodellen wird die Kollisionswahrscheinlichkeit und Unfallschwere prädiziert, z. B. Evasion Threat Metric (ETM) [80]
4. *Regelbasierte Metriken*: Unterscheidung von Szenarien basierend auf Regeln und Manövern. Qualitative Bewertung zur Analyse von

Verhaltensbereichen in Szenarien, z. B. Detektion, ob ein Einschervorgang oder Spurwechsel erfolgt ist.

Als Ziel zukünftiger Arbeiten nennt [79] die Integration der betrachteten Metriken in ein Framework und Softwaretool zur Kritikalitätsbewertung. Während der Fokus der meisten vorgestellten Metriken auf der Bewertung von Simulationen aus XIL-Tests liegt, sind die Metriken auch auf andere Testmethoden wie Erprobungsfahrten und Fahrversuche auf dem Prüfgelände übertragbar. Je nach Szenario und betrachtetem SuT müssen geeignete Kritikalitätsmetriken gewählt werden, die das Risiko eines Szenarios abbilden. Beispiele sind die Verwendung der Time Headway (THW) für die Bewertung von Szenarien mit einem in der Spur vorausfahrenden Fahrzeug oder die Relativgeschwindigkeit zur Bewertung der Unfallschwere im Falle einer Kollision. Für die Wahl von Metriken bietet [43] eine detaillierte Übersicht verschiedener Kritikalitätsmetriken.

Zusammenfassend bieten Kritikalitätsmetriken eine Möglichkeit zur automatisierten Identifikation von kritischen Szenarien in getesteten konkreten Szenarien. Somit können potenziell unsichere Szenarien nach ISO 21448 [45] identifiziert und die Entwicklung des Systems auf die Minimierung des Risikos in diesen Szenarien ausgerichtet werden (vgl. Abb. 2.4). Während Kritikalitätsmetriken einen relativen Vergleich der Kritikalität zwischen Szenarien ermöglichen, beinhalten sie keine Bewertung eines unangemessenen Risikos in einem Szenario. Damit können Kritikalitätsmetriken für die Definition von Akzeptanzkriterien für unangemessenes Risiko verwendet werden, benötigen aber die Definition eines zulässigen Kritikalitätswerts in Abhängigkeit vom betrachteten Szenario.

### **3.3 Absicherung und Freigabe automatisierter Fahrzeuge**

#### **3.3.1 Szenarienbasierte Absicherung**

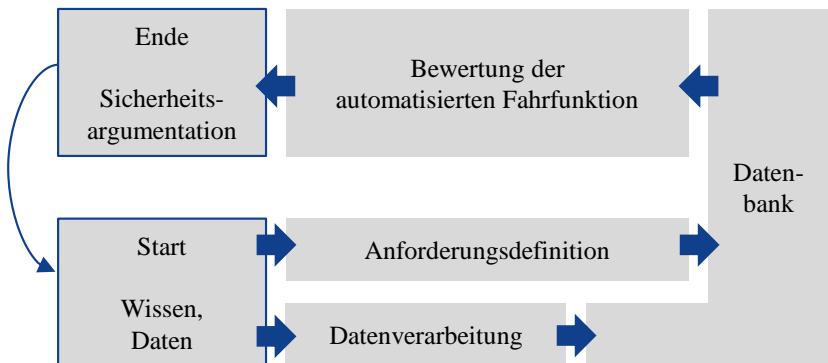
Den Stand der Technik für die Absicherung von automatisierten Fahrzeugen nach SAE-Level 3 bildet das szenarienbasierte Testen, das nachfolgend detailliert eingeführt wird.

##### **3.3.1.1 Pegasus Methode**

Das von 2016 bis 2019 durchgeführte PEGASUS-Projekt hat wesentliche Beiträge zur Vereinheitlichung der Terminologie des szenarienbasierten Testens geschaffen und neue Methoden für die Absicherung und den Test automatisierter Fahrzeuge entwickelt. Das Ziel, ein allgemeingültiges Gütekriterium für die Freigabe von Systemen nach SAE-Level 3 zu definieren, konnte nicht erfüllt werden [13], [56]. Eine vereinfachte Übersicht der PEGASUS-Methode zeigt Abb. 3.8.

Zentraler Bestandteil der PEGASUS-Methode ist die Schaffung einer Datenbank basierend auf Expertenwissen und Daten. In der Datenbank werden die logischen Szenarien inklusive der Grenzen und Verteilungen aller Parameter gespeichert. Gemeinsam mit den definierten Anforderungen werden aus den Szenarien Testfälle erzeugt und in der Datenbank gespeichert.

Die Testfälle werden anschließend zur Bewertung der automatisierten Fahr-funktion ausgeführt. Die Ergebnisse der Bewertung werden in der Sicherheitsargumentation zusammengefasst.



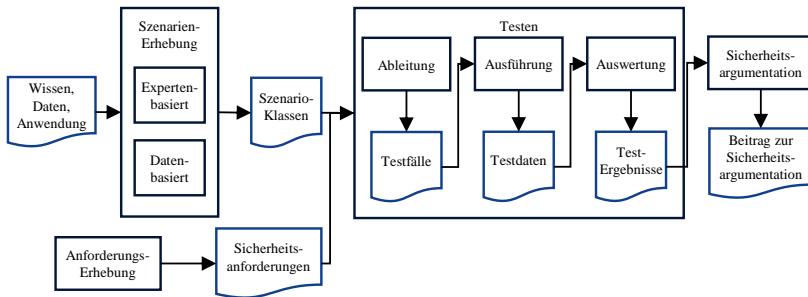
**Abbildung 3.8:** PEGASUS Methode [61] vereinfacht nach [81]

### 3.3.1.2 Szenarienbasierter Testprozess

Ausgehend von der PEGASUS-Methode definieren Neurohr et al. [82] ein Framework für das szenarienbasierte Testen, das in dieser Dissertation als Referenz verwendet wird (vgl. Abb. 3.9). Im ersten Schritt erfolgt die Einbindung von Wissen, Daten und Anwendungsfällen zur Erhebung und Definition von Szenarien. Unterschieden wird zwischen der wissensbasierten Erstellung von Szenarien durch Experten sowie der datengetriebenen Ableitung von Szenarien basierend auf gesammelten Fahrdaten.

Wie in [214] erläutert wurde, können wissens- und datengetriebene Methoden für die Identifikation von zuvor spezifizierten Szenarien in Fahrdaten kombiniert werden. Dafür wird in einem initialen Schritt ein Szenarienkatalog wissensbasiert definiert. Anschließend wird der Szenarienkatalog in einem iterativen Prozess erweitert, indem die Parameterverteilungen der spezifizierten Szenarien in Realdaten identifiziert und gefundene neue Szenarien hinzugefügt werden.

Als Abstraktionsebene von Szenarien für den Abgleich mit Realdaten eignen sich logische Szenarien. Diese beinhalten eine explizite Parameterdefinition, nach der in realen Fahrdaten mit einem Identifikationsalgorithmus gesucht werden kann.



**Abbildung 3.9:** Framework für szenarienbasiertes Testen basierend auf [82]

In den nächsten Schritten des Frameworks werden die generierten logischen Szenarien für den Test des SuT eingesetzt (vgl. Abb. 3.9). Hierfür werden zuerst mit einer Parametervariation konkrete Szenarien aus den logischen Szenarien abgeleitet. Zusammen mit den definierten Sicherheitsanforderungen resultieren Testfälle, die im zweiten Schritt auf geeigneten Testplattformen wie dem XIL-Test ausgeführt werden. Mit der Auswertung der Testdaten anhand der Sicherheitsanforderungen werden die Test-Ergebnisse generiert. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse aller Testfälle aggregiert und zur Bewertung des Systemverhaltens als Beitrag zur Sicherheitsargumentation verwendet.

Das Ziel des Prozesses ist die vollständige Abdeckung der ODD durch die spezifizierten logischen Szenarien als Grundlage der Sicherheitsargumentation gemäß ISO 21448 (vgl. Abb. 2.4). Die möglichen Datenquellen für die Szenariendatenbank basierend auf [9], [28] und [13] sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

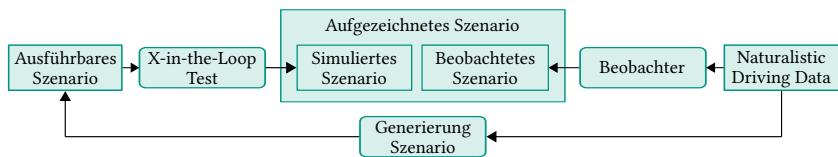
### 3.3.1.3 Arten von Szenarien nach Datenquelle

Innerhalb des szenarienbasierten Testprozesses werden verschiedene Datenquellen für die Szenarien-Erhebung und den Test des Systems eingesetzt (vgl. Tabelle 3.1).

**Tabelle 3.1:** Kategorien von Datenquellen für eine Szenariendatenbank nach [9], [28] und [13]

Kategorie	Datenquelle
virtuell	Verkehrssimulation
	Fahrsimulator
real	Felddaten <ul style="list-style-type: none"> <li>- Realfahrten</li> <li>- Naturalistic Driving Studies (NDS)</li> <li>- Feldbeobachtung</li> <li>- Field Operational Test (FOT)</li> </ul> Prüfgelände Unfalldatenbanken
verbal	Expertenwissen

Im Rahmen der Abstraktionsebenen für Szenarien in Abschnitt 3.2.1 wird nicht unterschieden, in welcher Form Szenarien aus den Datenquellen abgeleitet wurden. Für eine einheitliche Definition werden daher die Begriffe beobachtetes und simuliertes Szenario eingeführt. Die Begriffe basieren auf der Klassifikation der Arten von Szenarien nach ihrem Ursprung und den enthaltenen Informationen, die von Braun et al. [214] vorschlagen wurde. Das Verhältnis der Szenarien zueinander zeigt Abb. 3.10.

**Abbildung 3.10:** Arten von Szenarien in Anlehnung an die Definition aus [214]

Als Beobachter dient die Identifikation von Szenarien, bei der aus Naturalistic Driving Data (NDD) einzelne Szenarien extrahiert und in eine auf Zeitserien basierende Darstellungsform überführt werden. Diese beinhaltet alle notwendigen Informationen über das Ego-Verhalten sowie über das Verhalten der beteiligten Verkehrsteilnehmer. Die Quellen der NDD sind hier nicht auf in NDS gesammelte Fahrdaten beschränkt, sondern können z. B. Realdaten aus

dem FOT oder Drohnenaufnahmen aus der Feldbeobachtung enthalten (vgl. Tabelle 3.1).

**Definition Beobachtetes Szenario:** *Ein beobachtetes Szenario wird unter Anwendung eines Beobachters aus NDD extrahiert und in Form von Zeitserien (z. B. Trajektorien) dargestellt [214].*

Ein ausführbares Szenario wird aus NDD durch die Generierung einer maschinenlesbaren Szenarienbeschreibung erzeugt. Der Schritt „Generierung Szenario“ ist als Erweiterung der Darstellung von [214] in Abb. 3.10 eingezeichnet, um die in dieser Dissertation verwendete Einbindung von NDS in den XiL-Test zu verdeutlichen. Ausführbare Szenarien werden in einer Szenariensprache definiert (vgl. Abschnitt 3.2.1.3), z. B. unter Verwendung des Standards OpenSCENARIO zur Beschreibung des Verhaltens der dynamischen Akteure. Die statischen Szenarienelemente wie die Straße und Fahrbahnmarkierungen werden in einer Karte beschrieben, z. B. mit dem Standard OpenDRIVE.

Ein Beispiel für die Überführung von NDS in ausführbare Szenarien findet sich in [83]. Dort wird der mit Drohnen aufgezeichnete highD-Datensatz [84] in konkrete ausführbare Szenarien überführt und im ConScenD-Datensatz zur Verfügung gestellt. Die Generierung von ausführbaren Szenarien kann auch auf mit Versuchsfahrzeugen in der Ego-Perspektive gesammelte Fahrdaten angewendet werden. In [85] werden Spurwechsel-Szenarien extrahiert und ebenfalls in OpenX-Formate überführt.

**Definition Simulierte Szenario:** *Ein simuliertes Szenario wird durch Simulation eines ausführbaren Szenarios in einer XiL-Umgebung erzeugt und in Form von Zeitserien (z. B. Trajektorien) dargestellt.*

Als Testumgebungen sind neben XiL-Umgebungen auch Tests auf dem Prüfgelände möglich. In [214] wird für eine allgemeingültige Darstellung sowohl für XiL- als auch Prüfgeländetests der Begriff ausgeführtes Szenario vorgeschlagen, der simulierte Szenarien einschließt. Da im Rahmen dieser Dissertation ausschließlich XiL-Testumgebungen verwendet werden, wird in

Abb. 3.10 explizit der Begriff simuliertes Szenario eingeführt. Zusammenfassend werden die simulierten und beobachteten Szenarien als aufgezeichnete Szenarien bezeichnet, da beide im selben Format vorliegen und sich nur durch ihre Quelle unterscheiden [214].

### 3.3.1.4 Methoden zur Szenariengenerierung und Risikoschätzung

Ausgehend vom dargestellten szenarienbasierten Testprozess (vgl. Abb. 3.9) wurde der Standard ISO 34502 [86] entwickelt. Dieser fokussiert sich insbesondere auf die Identifikation von kritischen Szenarien (vgl. Abschnitt 3.2.3.2) und Methoden zur Ableitung einer Risikoschätzung über den Parameterraum der logischen Szenarien. ISO 34502 beinhaltet in Anhang J ein Konzept für die Risikobewertung basierend auf einer positiven Risikobilanz, das jedoch lediglich als informativer Teil deklariert ist. Daher wird nachfolgend ein Überblick über konkrete Methoden zur Generierung der Szenariendatenbank, der effizienten Identifikation von kritischen Szenarien sowie der statistischen Risikoschätzung gegeben.

#### Generierung Szenariendatenbank

Methoden zur Bestimmung von Parameterverteilungen als Teil der logischen Szenariendatenbank werden als Szenarienidentifikation oder -extraktion bezeichnet [61]. Diese sind die Grundlage für die Bestimmung von Parameterverteilungen, um eine stochastische Risikobewertung von Szenarien vorzunehmen. Elspas et al. [87] nutzen reguläre Ausdrücke für die Detektion von Szenarien in Fahrdaten. Probabilistische Methoden, basierend auf Zustandsmaschinen zur Manöverdetektion, verwenden z. B. [88]. Methoden zum Clustering von beobachteten konkreten Szenarien werden mit Autoencodern in [89] und trajektorienbasiert in [90] eingesetzt.

Elrofaei et al. präsentieren mit der Methode *Streetwise* [91] die Erstellung einer Szenariendatenbank durch die Identifikation von Szenarien in Realdaten.

Zuerst werden mit regelbasierten und maschinellen Lernverfahren alle Aktivitäten (z. B. Beschleunigung oder Verzögerung) der Fahrzeuge als Zeitabschnitte extrahiert. Zweitens werden die Positionen aller Fahrzeuge mit einer HD-Karte abgeglichen und Fahrspurzuweisungen erstellt. Drittens werden Szenarien auf der Grundlage einer für das jeweilige Szenario definierten Abfolge von Aktivitäten ermittelt. Im letzten Schritt werden Szenarienparameter wie der zeitliche Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug extrahiert. Aus den beobachteten Szenarien werden Parameterverteilungen als Grundlage der logischen Szenarien berechnet.

### **Identifikation von kritischen Szenarien**

Nachfolgend werden verschiedene Methoden vorgestellt, die sich auf die Abdeckung von logischen Szenarien sowie die effiziente Identifikation von kritischen Szenarien konzentrieren. Dabei wird eine Aussage über die Qualität des SuT durch die Aggregation der Bewertungen der aufgezeichneten konkreten Szenarien getroffen [92]. Ziel ist eine systematische Generierung von Testfällen, die in XIL-Testumgebungen ausgeführt und ausgewertet werden [28].

Klück et al. nutzen kombinatorisches Testen zusammen mit einer auf einer Ontologie basierenden Beschreibung der ODD für die Generierung von Testfällen für automatisierte Fahrfunktionen [93]. Durch den Einsatz von Optimierungsalgorithmen basierend auf der Kritikalität, wird eine Fokussierung auf kritische Bereiche zur Bestimmung von Systemgrenzen umgesetzt und in [94] für ein ALKS angewendet. Von Schütt [95] wird Bayes-Optimierung für die effiziente Suche von kritischen Bereichen in einem logischen Szenario eingesetzt.

Alternative Ansätze mit Optimierungsverfahren zur Auswahl von kritischen Szenarien werden in [96] und [97] mittels klassischer Optimierungsmethoden und Machine Learning Ansätzen vorgestellt. Ziel der Ansätze ist die Reduktion der notwendigen Testfälle innerhalb des Parameterraums der logischen Szenarien. Auch für abstrakte Szenarien existieren erste Ansätze für Optimierungsverfahren. Ransiek et al. nutzen in [215] ein Ziel-konditioniertes Reinforcement Learning Verfahren, um, inspiriert durch die Szenariensprache OpenSCENARIO DSL, automatisiert realistische Szenarien zu generieren.

## Statistische Risikoschätzung

Rasch et al. präsentieren in [10] eine Methode zur Bestimmung der Kollisionswahrscheinlichkeit eines SuT innerhalb des Parameterraums von logischen Szenarien. Durch die Verwendung von Verteilungsfunktionen der Parameter erfolgt die Bestimmung der wahrscheinlichsten kritischen Regionen im Parameterraum. Zur Berechnung von Kollisionswahrscheinlichkeiten werden Methoden der Zuverlässigkeitssanalyse aus der Strukturmechanik für die Absicherung automatisierter Fahrzeuge übertragen. Aufgrund der zu erwartenden niedrigen Ausfallwahrscheinlichkeit der Systeme und einer hohen Anzahl von Parametern muss in der Zuverlässigkeitssanalyse eine Kollisionsregion mit niedriger Auftretenswahrscheinlichkeit effizient identifiziert werden. Daher wurde ein Ansatz entwickelt, der im ersten Schritt ein Metamodell zur Identifikation der einflussreichsten Parameter und der Kollisionsregion verwendet. Im zweiten Schritt wird ein gezieltes Importance Sampling in den identifizierten Fehlerregionen durchgeführt, um die Schätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit zu verbessern. Abschließend kann mit in Realdaten identifizierten Parameterverteilungen und Auftretenswahrscheinlichkeiten der logischen Szenarien eine Kollisionswahrscheinlichkeit innerhalb der ODD ermittelt werden.

De Gelder et al. [98] stellen ein ähnliches Vorgehen zur quantitativen Bestimmung des Risikos eines automatisierten Fahrzeugs in der Simulation vor. Die Methode wird mit den Anforderungen der Normen ISO 26262 und ISO 21448 verglichen und unterstützt eine Dekomposition des Risikos in die drei Kategorien Exposure, Severity und Controllability der ISO 26262. In [99] wird eine Methode zur Generierung und Abdeckung von Szenarien mit Verteilungsfunktionen beschrieben. Ausgehend von einer möglichst detaillierten Parameterisierung eines logischen Szenarios wird mit einer Singulärwertzerlegung der Parameterraum auf die einflussreichsten Parameter eingeschränkt. Darauf aufbauend wird ein Maß für die Repräsentativität von Szenarien basierend auf der Wasserstein-Distanz vorgestellt, die die Ähnlichkeit von Verteilungen bestimmt. Das Repräsentativitätsmaß wird berechnet als Ähnlichkeit der aus Realdaten identifizierten Parameterverteilung zu der für die Szenariengenerierung verwendeten Verteilung des reduzierten Parameterraums. Damit

beschreibt das Maß, wie repräsentativ das generierte Testset gegenüber den vorhandenen Realdaten ist.

Als ergänzende bzw. alternative Methode schlägt Foretellix [69] einen abdeckungsbasierten Verifikationsansatz (engl. Coverage Driven Verification) vor. Darin werden der Raum von Parametern in Bereiche unterteilt und unter Verwendung einer Parametervariation konkrete Szenarien in jedem der definierten Parameterbereiche erzeugt. Als Ausgangspunkt dienen in M-Scenario Description Language (SDL) bzw. OpenSCENARIO DSL (vgl. Abschnitt 3.2.1.3) definierte abstrakte Szenarien, wobei mit Hilfe eines Constraint-Solvers die Erzeugung von validen konkreten Szenarien innerhalb der definierten Bedingungen (engl. Constraints) sichergestellt wird. Neben der Abdeckung der Eingangsparameter kann der Ansatz auf Metriken angewendet werden, die nach Ausführung eines Testfalls berechnet werden. So kann z. B. die Abdeckung von Szenarien in kritischen Bereichen angestrebt werden.

### **3.3.2 Anforderungen an Datenquellen**

Nachfolgend wird die Verfügbarkeit und Qualität von Realdaten auf drei Anforderungen an mögliche Datenquellen für Szenarien heruntergebrochen (vgl. Tabelle 3.3). Dabei wird ein Fokus auf Realdaten mit unsicheren, bzw. kritischen Szenarien gemäß der Szenarien-Matrix aus ISO 21448 gelegt (vgl. Abb. 2.4). Eine aus der Unfallforschung stammende Klassifikation von kritischen Realdaten stellt die Unterscheidung von kritischen Szenarien mit und ohne Unfallfolgen dar (engl. Crash und Near-Crash). Als kritisches Szenario ohne Unfallfolgen wird ein Szenario bezeichnet, bei dem ein Ausweichmanöver erforderlich ist und im Verhältnis zur Reaktionszeit und dem möglichen Kollisionszeitpunkt schnell ausgeführt werden muss, um einen Unfall zu vermeiden [100].

### 3.3.2.1 Verfügbarkeit menschliche Referenz

Um die Abwesenheit eines unangemessenen Risikos gemäß ISO 21448 nachzuweisen, müssen Daten von menschlichen Fahrern sowohl in kritischen Szenarien mit Unfallfolgen als auch in Szenarien ohne Unfallfolgen als Grundlage der Bewertung gesammelt werden. Unfalldaten können zur Überprüfung der Frage eingesetzt werden, ob das SuT in der Lage ist, Unfälle in für den Menschen nicht beherrschbaren Szenarien zu verhindern. Die Daten liefern jedoch keine Aussage darüber, ob das SuT auch Kollisionen in kritischen Szenarien verhindert, die für einen menschlichen Fahrer beherrschbar sind. Dies kann dazu führen, dass die Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Einführung von automatisierten Fahrzeugen überschätzt wird, wenn ausschließlich Unfalldaten verwendet werden. Für die Argumentation der Abwesenheit von unangemessenem Risiko ergibt sich folglich die Berücksichtigung von kritischen Szenarien mit und ohne Unfallfolgen als zusätzliche Anforderung an die Datenquellen.

Weitere Gründe für die Einbeziehung von kritischen Szenarien ohne Unfallfolgen sind die höhere Datenverfügbarkeit aufgrund der höheren Auftretenswahrscheinlichkeit sowie die Analyse der Kritikalitätsphänomene, die zu den kritischen Szenarien und Unfällen führen [67]. Durch die Überführung der Daten in ausführbare Szenarien kann die Leistungsfähigkeit des SuT in den Szenarien bestimmt und mit dem menschlichen Fahrer verglichen werden (vgl. Abschnitt 3.3.1.3). In Abb. 3.11 werden die Dimensionen des Vergleichs und deren Auswirkungen auf die Veränderung des Risikos in Form einer Matrix gegenübergestellt.

Für den Nachweis der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos mit einer szenarienbasierten Betrachtung sind die beiden markierten Bereiche des beabsichtigten positiven Effektes und des unbeabsichtigten negativen Effektes von entscheidender Bedeutung. Für Szenarien mit einer Verhinderung von menschlichen Unfällen durch das SuT kann eine Reduzierung des Restrisikos gegenüber dem menschlichen Fahrer im Sinne einer szenarienbasierten positiven Risikobilanz gezeigt werden.

		Mensch Kritische Szenarien ohne Unfallfolgen	Mensch Kritische Szenarien mit Unfallfolgen
System under Test Kritische Szenarien ohne Unfallfolgen		SuT und Mensch verhindern Kollision	<b>Beabsichtigter positiver Effekt</b> SuT verhindert menschliche Kollision
System under Test Kritische Szenarien mit Unfallfolgen		<b>Unbeabsichtigter negativer Effekt</b> SuT kann Kollision nicht verhindern, die Mensch verhindert	SuT und Mensch können Kollision nicht verhindern
		↑	↑

**Abbildung 3.11:** Matrix: Unfall vs. Beinahe-Unfall, Mensch vs. System under Test

Kommt es für das SuT in Szenarien zu Kollisionen, in denen der Mensch einen Unfall in einem kritischen Szenario verhindert, steigt hingegen das Restrisiko und kann ein unangemessenes Risiko darstellen. Zur Bewertung des Risikos in diesen Fällen bestehen die folgenden beiden Möglichkeiten.

Zuerst können Modifikationen des Systems durchgeführt werden, mit denen die Leistungsfähigkeit des Systems erhöht und weitere Kollisionen verhindert werden können. Dieses Ziel der Entwicklung zur Reduzierung des Restrisikos ist durch die beiden Pfeile in Abb. 3.11 dargestellt, die der Überführung von unsicheren in sichere Szenarien gemäß ISO 21448 entsprechen (vgl. Abb. 2.4). Als zweite Möglichkeit kann der Nachweis erbracht werden, dass die Akzeptanzkriterien erfüllt wurden, obwohl eine Kollision des SuT vorliegt. Dies kann der Fall sein, wenn der menschliche Fahrer in dem betrachteten kritischen Szenario eine überdurchschnittlich hohe Leistungsfähigkeit zeigt, die über einem Akzeptanzkriterium liegt, das basierend auf einem durchschnittlichen Fahrer definiert wurde.

Diese Unterscheidung zeigt, dass die Wahl der zugrunde gelegten menschlichen Referenz entscheidende Bedeutung für den Nachweis der Abwesenheit

eines unangemessenen Risikos als Teil der Sicherheitsargumentation hat. Zurzeit existiert jedoch keine standardisierte Vorgehensweise zur Definition von Akzeptanzkriterien innerhalb der Empfehlungen von ISO 21448 oder für die Festlegung einer Referenz basierend auf dem menschlichen Fahrer [50] [51]. Damit handelt es sich um eine offene Forschungsfrage (vgl. Anforderung 3), die in Abschnitt 3.3.6 betrachtet wird.

Nicht dargestellt ist an dieser Stelle die Unfallschwere als zusätzliche Dimension bei der Bestimmung des Restrisikos. So kann eine Verminderung der Unfallschwere auch in Szenarien zu einer Reduzierung des Risikos beitragen, in denen ein Unfall nicht verhindert wird, bzw. werden kann.

Von Datenquellen basierend auf menschlichen Fahrdaten werden hingegen neue Risiken durch die Einführung von automatisierten Fahrzeugen nicht abgebildet. Diese unbeabsichtigten negativen Auswirkungen können nur durch Erprobung des SuT im FOT und den szenarienbasierten Testansatz identifiziert und minimiert werden. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Fahrdaten sowie Unfallberichten von automatisierten Fahrzeugen können diese als zusätzliche Quellen für Szenarien eingesetzt werden [101].

### **3.3.2.2 Verfügbarkeit kritischer Realdaten**

Eine entscheidende Herausforderung für die Verfügbarkeit von kritischen Realdaten zur Ableitung einer menschlichen Referenz ist, dass kritische Szenarien aufgrund der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit je nach Datenquelle nur unzureichend abgebildet werden. Hier liegt der bereits in Kapitel 1 motivierte Zusammenhang zugrunde, dass eine distanzbasierte Absicherung alleine mit realen Erprobungsfahrten nicht wirtschaftlich realisierbar ist. Der Zusammenhang wird daher auch als Freigabefalle des automatisierten Fahrens [7] oder Dilemma des zufälligen Testens bezeichnet [28].

Zur Veranschaulichung sind in Tabelle 3.2 die Auftretensraten von Unfällen aufgeteilt nach verschiedenen Unfallkategorien dargestellt. Die Daten sind für

Nutzfahrzeuge der Klasse 8 (zulässiges Gesamtgewicht >33.001 lbs) auf Autobahnen in den USA unter Verwendung von NDS aus den Jahren 2016 bis 2018 ausgewertet worden [100].

**Tabelle 3.2:** Unfallrate von Nutzfahrzeugen der Klasse 8 auf US Autobahnen aus [100]

Unfallkategorie	Unfallrate pro 100 Millionen Fahrzeugmeilen
Konflikt ohne andere Beteiligte	11.9
Konflikt mit vorausfahrendem Fahrzeug	11.1
Konflikt mit Hindernis/Objekt auf der Straße	28.4
Konflikt mit Tier	17.8
Konflikt mit Fahrzeug in benachbarter Fahrspur	28.4
Konflikt mit Fahrzeugen, die die Spur wechseln oder von der Fahrspur abweichen	0.5
Konflikt mit einem nachfolgenden Fahrzeug	7.0
Konflikt mit einem geparkten Fahrzeug	0.6
Konflikt mit einem außer Kontrolle geratenen Fahrzeug auf der Straße	3.7
Konflikt mit Fußgänger	0.1
Sonstige	0.1

Die geringen Auftretensraten zeigen, dass die ausreichende Abdeckung aller Kategorien nicht alleine basierend auf einer einzelnen im FOT oder in Realfahrten gewonnenen Datenquelle wirtschaftlich realisierbar ist.

Daraus ergibt sich die Anforderung einer ausreichenden Verfügbarkeit von kritischen Daten mit und ohne Unfallfolgen in den verwendeten Datenquellen. Der erste Grund hierfür ist, dass es sich um unbekannte Szenarien handeln kann, die noch nicht durch die Szenariendatenbank abgedeckt werden. Als zweiter Grund kann das kritische Szenario zwar grundsätzlich bekannt sein, jedoch nicht ausreichend durch die Modellierung der logischen Szenarien in der Szenariendatenbank abgebildet werden. Dies umfasst z. B. die Parametergrenzen, die für Szenarien basierend auf Realdaten berücksichtigt werden. Kritische Szenarien können in Randbereichen der Parameterverteilungen

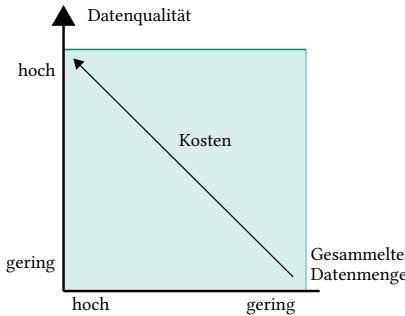
liegen und sogenannte Edge Cases darstellen, z. B. für hohe Bremsbeschleunigungen von vorausfahrenden Fahrzeugen, was das Risiko eines Auffahrungs-falls erhöht. Zusammenfassend kann ein Abgleich der Szenariendatenbank mit den kritischen Realdaten erfolgen und zur Validierung der Szenarienda-tenbank beitragen.

Es existieren erste Ansätze zur Quantifizierung, wie viele Daten aus einer einzelnen Datenquelle erforderlich sind. Hauer [102] modelliert dies als *Coupon Collectors* Problem und de Geler als Problem der *Unseen Species* [103]. De Geler verweist außerdem auf das Potenzial durch die Kombination verschiedener Datenquellen, um gezielt kritische Daten zu berücksichtigen [103]. Bei-de Ansätze stellen einen vielversprechenden Ansatz dar, berücksichtigen je-doch lediglich ein aggregiertes Maß für das Restrisiko und sind daher nicht ausreichend für die szenarienbasierte Argumentation der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos.

### 3.3.2.3 Datenqualität

Als weitere Anforderung an die Datenquelle muss die Datenqualität und das Datenformat geeignet sein, um sowohl beobachtete Szenarien in Form von Trajektoriendaten abzuleiten, als auch ausführbare Szenarien für den simulationsbasierten Test zu generieren. Im Rahmen des europäischen UDrive-Projekts wurde der Zusammenhang zwischen der Menge an gesammelten Daten und der eingesetzten Technologie für NDS untersucht [104]. Der in Abb. 3.12 dargestellte konzeptionelle Zusammenhang kann neben NDS auch auf andere Datenquellen wie den FOT übertragen werden. Somit ergibt sich ein kostenbedingter Kompromiss zwischen der erzielten Verfügbarkeit von Daten sowie der mit der eingesetzten Messtechnologie erzielbaren Datenqua-lität.

Ein Beispiel für eine Datenquelle mit geringer Qualität, aber hoher Anzahl von kritischen Events, stellen Event Data Recorder (EDR) dar, die mittlerweile in mehreren Ländern gesetzlich verpflichtend sind und im Fall von Unfällen grundlegende Messgrößen wie die Beschleunigung aufzeichnen [105].



**Abbildung 3.12:** Konzeptioneller Zusammenhang zwischen gesammelter Datenmenge und Datenqualität angelehnt an [104]

Eine hohe Qualität kann hingegen mit Prototypenfahrzeugen mit umfangreicher Messtechnik erzielt werden. Im Jahr 2022 wurden z. B. in Kalifornien insgesamt 5,7 Millionen Meilen von Fahrzeugen im automatisierten Modus für Testzwecke oder im Betrieb als Roboter-Taxi zurückgelegt [106]. Zusätzlich zur Datenmenge sind relevante Aspekte unter anderem das entwickelte SuT sowie die angestrebte ODD inklusive der Abdeckung von Wetterbedingungen, Jahreszeiten und Verkehrsbedingungen.

### 3.3.2.4 Diskussion

Untersuchungen verschiedener Datenquellen für Szenarien wurden bereits von Sippl [13] und Pfeffer [28] durchgeführt. Daher werden die Unterschiede zwischen den in beiden Arbeiten untersuchten Fragestellungen und der Zielsetzung dieser Dissertation untersucht.

Sippl untersucht verschiedene Datenquellen von Szenarien mit dem Ziel der „Identifikation relevanter Verkehrssituationen für die szenarienbasierte Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen“ [13]. Dabei folgert er, dass die alleinige Betrachtung von Unfalldatenbanken und Kritikalitätsmetriken nicht ausreicht, um alle typischen und relevanten Situationen zu identifizieren. Darauf aufbauend wird eine Methode zur Definition und Identifikation typischer und relevanter Situationen sowie deren Integration in den Entwicklungsprozess

vorgeschlagen. Hierzu werden aus Verkehrssimulationen generierte synthetische Datensätze verwendet.

Als Unterscheidung zu der von Sippl [13] getroffenen Bewertung von Datenquellen ergibt sich der Fokus auf die Gewinnung von kritischen statt typischen Szenarien. Der vorgeschlagene Prozess ist als Erweiterung bestehender Prozesse des szenarienbasierten Testens zu sehen und adressiert die Problemstellung, dass kritische Szenarien mit geringer Auftretenswahrscheinlichkeit je nach Datenquelle nur unzureichend abgebildet werden. Die systematische Identifikation relevanter Verkehrssituationen stellt damit eine Voraussetzung des Prozesses dar und kann z. B. nach dem von Sippl vorgeschlagenen Prozess erfolgen.

Pfeffer schlägt einen Prozess zur Generierung von Szenarienkatalogen für die funktionale Absicherung basierend auf Realdaten vor [28]. Der Prozess wird anhand eines synthetischen Datensatzes aus der Verkehrssimulation entwickelt und mit den Realdaten der Datensätze highD und Lyft Level 5 validiert. In beiden Datensätzen liegt jedoch eine unzureichende Abdeckung von kritischen Szenarien vor. Insbesondere enthalten die verwendeten highD- und Lyft-Datensätze keine Kollisionen und sind damit nicht geeignet für die Zielsetzung des in dieser Arbeit entwickelten Prozesses [83] [107].

Zu beiden Arbeiten ergibt sich ein weiterer zentraler Unterschied in dieser Dissertation. Für den Vergleich des SuT mit Akzeptanzkriterien basierend auf der menschlichen Leistungsfähigkeit ist die Berücksichtigung des menschlichen Verhaltens in den beobachteten Szenarien notwendig. Während die genannten Methoden die Situation bzw. das Szenario aus der Ego-Perspektive beschreiben, ist keine Bewertung des aufgezeichneten Ego-Verhaltens Teil der resultierenden Szenarienbeschreibung. Dies stellt eine Limitierung der Szenarienbeschreibung mit dem 6-Ebenen Modell dar, welches um eine zusätzliche Ebene mit Informationen und Bewertungen des Ego-Verhaltens erweitert werden müsste. Für den Vergleich zwischen menschlichem Fahrer und dem SuT ist folglich ein neuer Prozess sowie die Untersuchung hierfür geeigneter Datenquellen notwendig.

### 3.3.3 Vergleich verschiedener Datenquellen

Für die Sammlung und Auswahl kritischer Realdaten werden die in Tabelle 3.1 eingeführten Datenquellen zum Aufbau einer Szenariendatenbank verglichen. Ausgehend von den zuvor diskutierten Anforderungen, wird bei der Bewertung unterschieden zwischen kritischen Szenarien mit und ohne Unfallfolgen. Als Bewertungskriterien werden die Verfügbarkeit von kritischen Szenarien mit Unfallfolgen a1) sowie ohne Unfallfolgen a2), die Datenqualität b) und die Verfügbarkeit einer menschlichen Referenz c) definiert. Der Grad der Erfüllung der Kriterien wird unterteilt in die vier Kategorien sehr hoch (++), hoch (+), gering (-) und sehr gering (- -).

An dieser Stelle nicht einbezogen wird Expertenwissen als Quelle von Szenarien für die Szenariendatenbank, da als Eingang des Prozesses Fahrdaten notwendig sind. Dies ist primär durch die Zielsetzung des Prozesses zur Reduzierung unbekannter Szenarien begründet, da aus Expertenwissen abgeleitete Szenarien bereits als bekannt angenommen werden können (vgl. Abb. 2.4).

#### 3.3.3.1 Bewertung der Datenquellen

**Verkehrssimulation:** Der Einsatz einer Verkehrssimulation ermöglicht die flexible und kostengünstige Generierung von Szenarien und wurde z. B. in [28] und [13] zur Generierung von Szenarien mit dem Ziel der Erstellung einer Szenariendatenbank eingesetzt. Durch Parametervariationen werden aus logischen Szenarien beliebig viele konkrete Szenarien erzeugt, mit denen die verschiedenen Ebenen der Szenarienbeschreibung (z. B. dynamische Objekte in Ebene 4 oder die Straße in Ebene 1) verändert werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Außerdem können Optimierungsansätze verwendet werden, um gezielt kritische Szenarien zu erzeugen (vgl. Abschnitt 3.3.1.4). Damit wird eine vergleichsweise hohe Verfügbarkeit von kritischen Szenarien mit und ohne Unfallfolgen ermöglicht.

Die Verkehrssimulation bietet den Vorteil, dass die Ground Truth bekannt ist. Allerdings ist das Verhalten der Verkehrsteilnehmer abhängig von der gewählten Modellierung und den verwendeten Verkehrs-, Fahrzeug- und Fahrermodellen. Daher wird die Datenqualität insgesamt als hoch bewertet. Ein Nachteil der Verkehrssimulation für die Anwendbarkeit im Rahmen des vorgeschlagenen Prozesses ist hingegen, dass keine Realdaten von menschlichen Fahrern vorliegen. Dies ist zwar durch Verwendung von Verkehrs- oder Fahrermodellen grundsätzlich möglich, erfordert aber ebenfalls eine Validierung der Modelle anhand von Realdaten.

**Fahrsimulator:** Der Einsatz von Fahrsimulatoren bietet die Möglichkeit, unter Laborbedingungen die Reaktionen von Probanden in verschiedenen Verkehrsszenarien zu untersuchen. Durch gezielte Modellierung der Szenarien können definierte Stimuli vorgegeben und die Reaktionszeit und Reaktionsintensität der Teilnehmer gemessen werden [108]. Z. B. lassen sich Szenarien so aufbauen, dass ein eindeutiger Zeitpunkt für das Erscheinen oder Bremsen von Objekten festgelegt wird, was in realen Fahrten nicht möglich ist. Außerdem wird im Fahrsimulator neben den kinematischen Größen des Ego-Fahrzeugs und der anderen Verkehrsteilnehmer auch Daten für den menschlichen Fahrer aufgezeichnet, z. B. durch Kameraaufnahmen mit Erkennung der Blickrichtung. Die Verfügbarkeit einer menschlichen Referenz wird daher als sehr hoch bewertet.

Die Datenqualität wird als hoch bewertet, da analog zur Verkehrssimulation die Ground Truth verfügbar ist, aber Modellannahmen für den Versuchsaufbau getroffen werden müssen. Durch den hohen Aufwand und notwendige Investitionen für die Durchführung von Simulatorstudien ist die Skalierbarkeit des Ansatzes unter wirtschaftlichen Randbedingungen nicht für alle logischen Szenarien realisierbar, um die volle ODD abzubilden [109] [110]. Daher wird die Datenverfügbarkeit als gering eingestuft.

**Realfahrten:** Realfahrten mit Versuchsfahrzeugen stellen eine etablierte Methode zur Datensammlung in der Automobilentwicklung dar. Während hohe Kosten für Versuchsträger durch die notwendige Messtechnik entstehen, ist

eine flexible Datensammlung innerhalb der ODD möglich [13]. So können gezielt Daten für bestimmte Umgebungen wie Baustellen oder Wetterbedingungen gesammelt werden. Dabei wird die eingesetzte Sensorik des Versuchsträgers und die Planung der Versuchsfahrten auf die Anforderungen des Zielsystems abgestimmt. Nachteilig ist hingegen, dass durch die limitierte Perspektive des Ego-Fahrzeugs keine vollständige Erfassung des Szenarios im Sinne einer Ground Truth möglich ist. Die Datenqualität ist folglich abhängig von der verbauten Sensorik und wird insgesamt als hoch bewertet. Daten aus realen Erprobungsfahrten wurden z. B. in [87], [88], [85] und [111] zur Detektion und Extraktion von Szenarien mit Spurwechseln und Einscherern eingesetzt.

Realfahrten werden von menschlichen Fahrern durchgeführt und verfügen somit über eine menschliche Referenz. Durch den Einsatz von geschulten Fahrgästen sollen Unfallrisiken während Erprobungsfahrten reduziert und Unfälle vermieden werden. Dadurch kann eine abweichende Auftretenswahrscheinlichkeit von kritischen Szenarien gegenüber durchschnittlichen Fahrern entstehen. Außerdem schränkt dies insbesondere die distanzabhängige Verfügbarkeit von kritischen Szenarien mit Unfallfolgen weiter ein. Folglich wird die Verfügbarkeit von kritischen Szenarien mit Unfallfolgen als gering und ohne Unfallfolgen als hoch eingestuft.

**Field Operational Test:** Als Unterscheidung zwischen Realfahrten und dem FOT ergibt sich, dass der FOT zur Erprobung des SuT unter realen Bedingungen eingesetzt wird. Mit zunehmendem Automatisierungslevel steigen damit die Abweichungen gegenüber Realfahrten mit menschlichen Fahrern, da das System mehr Tätigkeiten der Fahraufgabe ausführt. Bei Fahrerassistenzsystemen wie einem Notbremsassistenten oder ACC unterscheidet sich das Fahrzeugverhalten durch die Unterstützung des Fahrers in bestimmten Situationen. Für Systeme mit SAE-Level 4 ohne menschlichen Fahrer liegt die Fahrzeugführung vollständig beim System. In diesen Fällen kann aus den Daten keine menschliche Referenz abgeleitet werden.

Die Datenqualität ist für hochautomatisierte Fahrzeuge als sehr hoch zu bewerten, da mit steigendem Automatisierungslevel die Sensoranforderungen und die erzielte Datenqualität zunehmen. Die Verfügbarkeit von kritischen

Szenarien ist wie bei Realfahrten durch die distanzabhängige Datensammlung und durch wirtschaftlich realisierbare Testumfänge limitiert. Auch beim Test von Systemen mit hohem Automatisierungslevel werden Sicherheitsfahrer eingesetzt, die in kritischen Szenarien als zusätzliche Rückfallebene dienen, um Unfälle zu vermeiden [112]. Für den FOT gibt es z. B. im Bundesstaat Kalifornien in den USA Meldepflichten für Unfälle mit automatisierten Fahrzeugen [101]. Seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 2014 wurden insgesamt 820 Kollisionen mit automatisierten Fahrzeugen gemeldet (Stand 23. Mai 2025) [113]. Die Unfallberichte sind frei abrufbar, bieten jedoch nur einen geringen Informationsgehalt und sind als Datenquelle den Unfalldatenbanken zuzuordnen.

**Naturalistic Driving Studies:** NDS untersuchen menschliches Fahrverhalten in Alltagssituationen, um daraus Erkenntnisse zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zu gewinnen. In [100] wurde bspw. der Einfluss der Geschwindigkeit in Verhältnis zum Geschwindigkeitslimits, das Beschleunigungsverhalten sowie die Distanz zum Führungsfahrzeug anhand von Daten aus NDS untersucht. Hierzu werden Fahrzeuge von Privatpersonen oder kommerziellen Flottenbetreibern mit Messtechnik ausgestattet, wobei typischerweise eine Rundumsicht mit Kameras sowie Signale des Controller Area Network (CAN) und Global Positioning System (GPS) aufgezeichnet werden [114]. Zusätzlich werden je nach Ziel der Studien auf den Fahrer gerichtete Kameras eingesetzt, um das Verhalten des Fahrers aufzuzeichnen. Deshalb wird die Verfügbarkeit einer menschlichen Referenz als sehr hoch bewertet.

Die bisher größte NDS ist die in den USA durchgeführte Studie Second Strategic Highway Research Program (SHRP2) [115]. Insgesamt wurden in 35 Millionen gefahrenen Meilen mehr als 1.900 Unfälle und über 6.900 kritische Szenarien ohne Unfallfolgen von Personenkleinstwagen (PKW) (engl. *light vehicles*) aufgezeichnet. Eine Übersicht über international durchgeführte NDS präsentiert [114].

Eine zunehmend an Bedeutung gewinnende Art von NDS sind Aufnahmen von Dashcams. Dabei handelt es sich um nachrüstbare oder als Sonderausstattung erwerbbare Systeme mit Kameras und zusätzlicher Messtechnik, die je nach System ebenfalls auf Fahrzeugdaten zugreifen können und Kameras

zur Aufnahme des Fahrers beinhalten. Neben Dashcams für den privaten Gebrauch existieren Anbieter, die sich auf die Überwachung von kommerziellen Fahrzeugflotten fokussieren. Ziel der Systeme ist die Erhöhung der Sicherheit durch Beobachtung und Unterstützung der Fahrer sowie eine Reduktion von Versicherungskosten. Die Reduktion entsteht einerseits durch die Senkung der Unfallwahrscheinlichkeit der Flotte durch gezielte Schulung der Fahrer. Andererseits erleichtern die Daten der Dashcam die Beweisführung im Fall von nicht selbst verschuldeten Unfällen und reduzieren Gerichts- und Schadensersatzkosten.

Während Studien wie SHRP2 eine kontinuierliche Datenaufzeichnung ermöglichen, werden Dashcam-Aufnahmen bei den meisten Systemen aufgrund der Menge der aufgezeichneten Daten nur bei definierten Events gespeichert. Triggerbedingungen für die Speicherung der Daten werden basierend auf Schwellwerten für kinematische Größen wie der Beschleunigung oder Warnungen und Eingriffen von Fahrerassistenzsystemen (z. B. Notbremsassistent) oder passiven Sicherheitssystemen (z. B. Airbags) definiert [100]. Durch die Trigger wird die Datensammlung auf kritische Szenarien eingeschränkt, bietet jedoch durch die Ausstattung vieler Fahrzeuge eine Skalierung der gefahrenen Distanzen. Bspw. wurden die Event-getriggerten Daten aus [100] über zwei Jahre für Nutzfahrzeuge der Klasse 8 aus 331 Kundenflotten gesammelt und decken insgesamt 5,5 Milliarden gefahrene Autobahnkilometer ab. Insgesamt wird die Verfügbarkeit kritischer Realdaten mit und ohne Unfallfolgen sowie die Datenqualität als hoch bewertet.

Aktuell existiert kein vollständig automatisierter Ansatz zur Überführung von Daten aus NDS in ausführbare Simulationsszenarien. Vielversprechende Ansätze zur Automatisierung basierend auf maschinellen Lernverfahren sind Gegenstand aktueller Forschung.

Chand et al. [116] setzen Verfahren der maschinellen Bildverarbeitung zur Erkennung von Unfällen in online verfügbaren Dashcam-Videos ein. Bashetty et al. [117] schlagen einen modularen Ansatz zur Extraktion von Szenarien

aus Videodaten vor, wobei einzelne Aufgaben wie die Spurerkennung, Objekterkennung und Schätzung der Egobewegung durch unterschiedliche Deep Learning Verfahren ausgeführt werden. Die Anfangsbedingungen der Szenarien unterliegen aufgrund unzureichender Informationen einer Unsicherheit hinsichtlich der kinematischen Größen des Ego-Fahrzeugs und der anderen Verkehrsteilnehmer. Daher wird ein zufälliges Sampling der Anfangsbedingungen eingesetzt, um innerhalb bestimmter Grenzen der Parameter verschiedene konkrete Szenarien zu erzeugen, die das tatsächlich aufgezeichnete Szenario nachbilden sollen. Miao et al. [118] verwenden Video Language Models zur Überführung von Dashcam-Videos in Simulationsszenarien im CARLA-Simulator und definieren einen iterativen Verbesserungsprozess, der die Ähnlichkeit zwischen Dashcam-Video und generiertem Simulationsszenario verbessert.

Die drei Ansätze sind abhängig von der verwendeten Datenquelle, und die Genauigkeit kann nicht anhand von Ground Truth Daten validiert werden. Da lediglich Videoaufnahmen ohne kinematische Messwerte aus dem Ego-Fahrzeug und integrierten Sensoren verwendet werden, ist die erreichbare Genauigkeit gegenüber NDS mit zusätzlicher Verfügbarkeit von weiteren Sensor- und Fahrzeugdaten reduziert. Außerdem bieten die verwendeten Videos aus dem Internet keine Möglichkeit, verlässliche Aussagen über die Fahrzeugklasse oder den Zustand des Fahrers des Ego-Fahrzeugs zu treffen sowie die Daten einer ODD zuzuordnen.

**Feldbeobachtung:** Daten aus der Feldbeobachtung werden mit ortsfester Messtechnik gewonnen, die den Verkehr auf bestimmten Straßenabschnitten aufzeichnet, wie der mit Verkehrskameras in den USA aufgezeichnete Datensatz Next Generation Simulation (NGSIM) [119]. Ein weiteres Beispiel ist der aus der Vogelperspektive aufgenommene INTERACTION-Datensatz [120], bei dem Verkehrskameras sowie Dronen für Aufnahmen von urbanen Kreuzungen in Deutschland, den USA, Bulgarien und China eingesetzt wurden. Ebenfalls aus Drohnenaufnahmen stammt der highD-Datensatz [84] mit Aufnahmen von Autobahnabschnitten, der in verschiedenen Forschungsarbeiten eingesetzt wurde (z. B. [28], [83]). Neben den highD-Daten wurden mit inD für Kreuzungen [121], exiD für Autobahnausfahrten [122] und uniD

für Aufnahmen auf einem Universitätscampus weitere Dronendatensätze veröffentlicht. Mittlerweile existieren auch kommerzielle Anbieter<sup>1</sup> für die Durchführung von Dronenaufnahmen und die Aufbereitung der Daten mit maschinellen Lernverfahren zur Bilderkennung und Szenariengenerierung.

Durch die Aufnahmen aus der Vogelperspektive können im Gegensatz zu Daten aus der Ego-Perspektive alle beteiligten Verkehrsteilnehmer im Bildausschnitt ähnlich einer Ground Truth erfasst werden. Somit sind Einflussfaktoren wie die temporäre Verdeckung von Objekten untersuchbar, da über deren Verhalten während der Verdeckung keine Annahmen getroffen werden müssen. Kombiniert mit maschinellen Verfahren zur Bilderkennung kann eine hohe Genauigkeit der Trajektorien der Verkehrsteilnehmer erreicht werden, weshalb die Datenqualität als sehr hoch bewertet wird. Obwohl Dronenaufnahmen eine höhere Flexibilität gegenüber ortsfester Messtechnik bieten, ist der Umfang der verfügbaren Datensätze aufgrund des Aufwands für die Aufzeichnung beschränkt. Bspw. sind im highD-Datensatz keine Kollisionen sowie nur wenige kritische Szenarien enthalten, und im INTERACTION-Datensatz ist eine Kollision mit geringen Unfallfolgen sowie mehrere kritische Szenarien enthalten. Dies führt dazu, dass wenige kritische Szenarien erfasst werden und die Verfügbarkeit der Daten ohne Unfall als gering und mit Unfall als sehr gering eingestuft wird.

**Prüfgelände:** Aufgezeichnete Szenarien aus Tests auf dem Prüfgelände werden z. B. in [216] und [123] zum Vergleich zwischen Realtests und Simulationen verwendet. Bei Einsatz geeigneter Messtechnik mit Differential-GPS zur Bestimmung der Objektpositionen wird eine sehr hohe Datenqualität erreicht. Kritische Szenarien mit und ohne Unfallfolgen werden mit sogenannten Soft Targets<sup>2</sup> nachgestellt, weisen aber einen hohen Aufwand für die Versuchsdurchführung auf. Außerdem werden Versuche auf dem Prüfgelände analog zum FOT typischerweise unter Verwendung des SuT durchgeführt, statt mit menschlichen Fahrern. Daher ist die Verfügbarkeit sowohl von kritischen Szenarien als auch der menschlichen Referenz als gering einzustufen.

---

<sup>1</sup> Vgl. z. B. <https://www.deepscenario.com/dataset> und <https://datafromsky.com>

<sup>2</sup> vgl. <https://www.abdynamics.com/de/products/track-testing/adas-targets/guided-soft-target>

**Unfalldatenbanken:**

Unfalldatenbanken ermöglichen die Analyse einzelner Unfälle anhand der Unfallberichte sowie die Erstellung von Unfallstatistiken. In Wissenschaft und Industrie häufig eingesetzte Unfalldatenbanken sind die deutsche German In-Depth Accident Study (GIDAS) [124] oder die von der amerikanischen NHTSA betriebenen Datenbanken Crash Report Sampling System (CRSS) [125] und Fatality Analysis Reporting System (FARS) [126] für tödliche Unfälle. Zur Bestimmung von aggregierten Maßen wie der Unfallrate pro zurückgelegtem Kilometer als Teil des Nachweises einer positiven Risikobilanz stellen Unfalldatenbanken die zentrale Datenquelle dar [110]. Unfalldatenbanken enthalten eine sehr hohe Anzahl von kritischen Szenarien mit Unfallfolgen, sind aber definitionsgemäß nicht anwendbar für kritische Daten ohne Unfallfolgen. Die Ableitung einer menschlichen Referenz aus den Daten ist folglich nur für Unfallszenarien möglich.

Unfalldatenbanken weisen eine sehr geringe Datenqualität auf, da lediglich textuelle Beschreibungen und Bilder vom Unfallort vorliegen. Die Rekonstruktion von Trajektorien aus Unfallberichten stellt einen hohen manuellen Aufwand mit Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad der verfügbaren Daten dar und wird z.B. in [127] verwendet. Die Datenbank GIDAS Pre-Crash Matrix (PCM) [128] enthält rekonstruierte Unfallszenarien in Form von Trajektorien, die mindestens die letzten fünf Sekunden vor der Kollision beinhalten und z.B. in [129] verwendet wurden. Gambi et al. [130] setzen Verfahren des Natural Language Processing (NLP) ein, um aus Unfallberichten der von der NHTSA durchgeföhrten National Motor Vehicle Crash Causation Survey (NMVCCS) ausführbare Simulationen zu generieren [131]. In [132] werden statt der textuellen Beschreibung die Skizzen aus den Unfallberichten verwendet, um den Unfallhergang zu rekonstruieren. Aus den beiden Datenbanken Crash Injury Research and Engineering Network (CIREN) [133] und NMVCCS wurden so 100 Unfallhergänge rekonstruiert.

### 3.3.3.2 Diskussion

Abschließend fasst Tabelle 3.3 die Bewertungen der verschiedenen Datenquellen für kritische Realdaten zusammen.

**Tabelle 3.3:** Bewertung von Datenquellen für kritische Szenarien nach den Kriterien Verfügbarkeit von kritischen Szenarien mit Unfallfolgen a1) sowie ohne Unfallfolgen a2), Datenqualität b) und Verfügbarkeit einer menschlichen Referenz c)

Datenquelle	Referenzen	a1)	a2)	b)	c)
Verkehrssimulation	[28][13][10][103]	++	++	+	-
Fahrimulator	[109][108]	-	-	+	++
Felddaten					
- Realfahrten	[87][88][111][85]	-	+	+	+
- NDS	[115][114]	+	+	+	++
- Feldbeobachtung	[119][120][84][122][121]	--	-	++	+
- FOT	[101][113]	-	+	++	-
Prüfgelände	[216][123]	-	-	++	-
Unfalldatenbanken	[128][130][132][127]	++	n/a	-	+

Die Untersuchung verschiedener Datenquellen für Szenarien in Tabelle 3.3 zeigt, dass keine der Quellen eine gleichzeitige Erfüllung aller Kriterien für kritische Daten aufweist. Während die Verkehrssimulation Vorteile durch die flexible Generierung von kritischen Szenarien bietet, ist keine sinnvolle Ableitung von Akzeptanzkriterien basierend auf realen menschlichen Fahrern möglich. Hierfür müssten menschliche Verhaltensmodelle in der Simulation eingesetzt werden, die wiederum selbst eine entsprechende Datengrundlage aus Realdaten benötigen.

Unfalldatenbanken decken zwar die größte Anzahl an Unfällen ab, bieten jedoch nur eine geringe Datenqualität durch die fehlende Verfügbarkeit von Trajektorien oder Karten. Durch das Fehlen von kritischen Szenarien ohne Unfallfolgen sind Unfalldatenbanken als alleinige Szenarienquelle nicht ausreichend. Die Daten können hingegen als zusätzliche Quelle für Realdaten im Prozess berücksichtigt werden.

Die zentrale Limitierung der vorgestellten Arten von Felddaten ist die Abhängigkeit von der distanzbasierten Datensammlung. Durch die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit von kritischen Szenarien ist eine hohe Verfügbarkeit insbesondere von Unfallszenarien unter ökonomischen Gesichtspunkten nicht allein mit Realfahrten, Feldbeobachtung und FOT realisierbar.

NDS bieten die Möglichkeit, umfangreiche Daten für kritische Szenarien zu gewinnen, und weisen als einzige der Datenquellen eine gleichzeitig hohe Erfüllung aller Kriterien auf. Neben der Verfügbarkeit von Daten eignen sich NDS auch zur Ableitung einer menschlichen Referenz sowohl für kritische Daten mit als auch ohne Unfallfolgen. Eine Möglichkeit hierzu sind umfangreiche öffentlich geförderte Forschungsprojekte wie SHRP2, die eine hohe Kilometerleistung abdecken. Während in SHRP2 nur PKW zur Datensammlung verwendet wurden, existieren auch Studien zu Nutzfahrzeugen. Bspw. wurden in den in [100] verwendeten Studien „FMCSA's Advanced System Testing utilizing a Data Acquisition System on the Highways (FAST DASH)“ 2,9 Millionen Meilen, in „Onboard Monitoring Systems Field Operational Test (OBMS FOT)“ 2,7 Millionen Meilen und in „Canadian Naturalistic Truck Dataset (CNTD)“ 0,9 Millionen Meilen aufgezeichnet.

Eine vielversprechende alternative Möglichkeit stellen kommerzielle Flottenüberwachungssysteme, basierend auf Dashcams und integrierter Sensorik, dar, die insbesondere von Logistikunternehmen im Nutzfahrzeugbereich verbreitet eingesetzt werden. Solche Event-basierten Aufzeichnungen von kritischen Szenarien wurden ebenfalls von Krum et al. [100] eingesetzt, um ausgehend von der zurückgelegten Strecke und den aufgezeichneten Unfällen die durchschnittlichen Unfallraten von Nutzfahrzeugen auf Autobahnen in den USA zu bestimmen. Der Vorteil der Event-basierten Daten ist, dass die Unfallrate durch die bekannte zurückgelegte Strecke direkt aus den Daten ermittelt werden kann, statt mit Unfalldatenbanken auf übergeordneten Statistiken für die Fahrleistung und Unfallzahl berechnet zu werden. Außerdem umfassen Unfalldatenbanken im Gegensatz zu den Event-basierten Daten nur gemeldete Unfälle aus Polizeiberichten, wodurch insbesondere die Zahl von nicht gemeldeten Unfällen mit geringen Unfallschäden unterrepräsentiert sein kann [100].

Ein weiterer Vorteil ist die Einschränkung der Daten auf den konkreten Anwendungsfall von hochautomatisierten Nutzfahrzeugen. Mit der Auswertung von geografischen Informationen sowie den eingesetzten Fahrzeugen ist eine gezielte Untersuchung einer angestrebten ODD möglich. Dadurch erhalten Hersteller von automatisierten Fahrzeugen sowie Gesetzgeber eine genauere Übersicht über das Risikoprofil einer definierten ODD im Gegensatz zu einem nationalen Durchschnitt.

Herausforderungen ergeben sich durch die Verwendung unterschiedlicher Systeme für Messtechnik, die Definition der Trigger für die Aufzeichnung von Events sowie die folgende Datenverarbeitung durch die Anbieter der Überwachungssysteme. Deshalb muss die Auswertung und Einbindung der Daten abhängig vom verfügbaren System und Anbieter erfolgen.

### **3.3.4 Absicherung von Fahrfunktionen mit SAE-Level 4 und 5**

Als Nachfolger von PEGASUS und ENABLE-S3 [134] beschäftigten sich die Projekte SET Level [135] und VVM [136] mit der Absicherung von automatisierten Systemen auf SAE-Level 4 und 5 im urbanen Umfeld.

Der Fokus des Projekts SET Level lag auf simulationsbasierten Methoden für Test und Entwicklung [135]. Es wurden die drei Anwendungsfälle der Kritikalitätsanalyse, der Closed-Loop Simulation auf Systemebene und der Open-Loop Simulation auf Komponentenebene untersucht. Ziel ist eine modulare und generische Simulationsarchitektur, die eine Integration von kommerziellen und Open-Source Simulations-Plattformen und Werkzeugen erlaubt [137]. Die Ergebnisse des bis August 2022 laufenden Projekts fließen u. a. in die Weiterentwicklung der Standards OpenSCENARIO XML, OpenDRIVE (vgl. Abschnitt 3.2.1.3) und Open Simulation Interface (OSI) [138] der ASAM ein.

Im VVM-Projekt [139] wurde ein Framework für die Absicherung automatisierter Fahrfunktionen nach SAE-Level 4 und 5 im Open World Kontext entwickelt (vgl. Abb. 3.13).

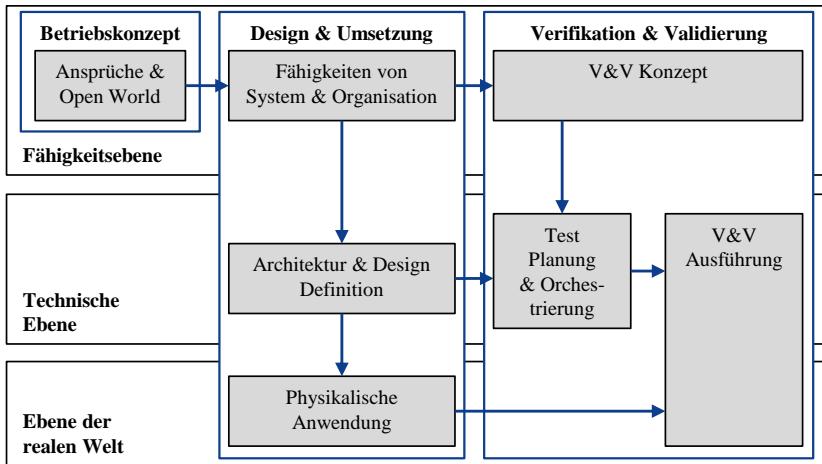


Abbildung 3.13: Vereinfachte Darstellung des VVM Absicherungs-Framework aus [139]

Die Argumentation ermöglicht eine nachverfolgbare Auswahl und Orchestrierung von Verifikations- und Validierungsmethoden basierend auf den Ansprüchen des Betriebskonzeptes [140]. Entscheidend ist die durchgehende Nachverfolgbarkeit vom Betriebskonzept hin zu den Nachweisen, die in jedem der nachfolgenden Schritte generiert werden. Dies ist in Abb. 3.13 dargestellt durch die unidirekionalen Verbindungen zwischen und innerhalb der vertikalen Domänen Betriebskonzept, Design und Umsetzung sowie Verifikation und Validierung. Zusätzlich werden drei horizontale Ebenen basierend auf dem Entwicklungsprozess unterteilt (vgl. Abschnitt 2.3). In der Fähigkeitsebene werden Ansprüche mit Akzeptanzkriterien definiert, in erforderliche Fähigkeiten von System und Organisation übersetzt und ein Verifikations- und Validierungskonzept zum Nachweis entwickelt. In die Akzeptanzkriterien des Betriebskonzeptes fließen Standards und Normen (z. B. ISO 26262 und ISO 21448), gesetzliche Regelungen (z. B. Produkthaftung und UN-Regelung R157 für ALKS [141]) sowie ethische Fragen [142] ein. In der technischen Ebene werden funktionale sowie technische Architektur und Design (vgl. Abschnitt 2.3.1) festgelegt, Tests geplant, auf geeignete Testplattformen orchestriert und nach der Testausführung evaluiert. In der Ebene

der realen Welt wird unter unkontrollierten Bedingungen im Open World Kontext die finale physikalische Implementierung mit der Testausführung verifiziert und validiert (vgl. Abschnitt 3.1.1).

Für die Verifikation und Validierung als Teil des VVM-Frameworks identifiziert [143] die nachfolgenden Herausforderungen für das V&V-Konzept, die Testplanung und Orchestrierung sowie die V&V-Ausführung (vgl. Abb. 3.13).

1. *Konformität* erfordert den Nachweis der Erfüllung der Anforderungen des Betriebskonzepts in der Sicherheitsargumentation.
2. *Anwendbarkeit* im Open World Kontext der realen Welt erfordert die Abdeckung einer enormen Vielfalt von Bedingungen.
3. *Veränderbarkeit* der Umwelt und der Anforderungen erfordert eine Verifikation und Validierung von Komponenten, die unabhängig von Änderungen in anderen Komponenten ist.
4. *Effizienz* bei der Testdurchführung erfordert die Durchgängigkeit zwischen und Orchestrierung zu geeigneten Testumgebungen.

Für die Lösung der Herausforderungen setzt das VVM-Projekt insbesondere auf die Dekomposition des Systementwurfs, der Szenarien sowie der Systemanforderungen [143]. Ein Beispiel für eine hierfür entwickelte Methode ist die Kritikalitätsanalyse [67] zur Strukturierung des Open World Problems und zur Identifikation von Kritikalitätsphänomenen (vgl. Abschnitt 3.2.3). Außerdem wurde eine Sicherheitsargumentation entwickelt, die die innerhalb des Frameworks generierten Nachweise strukturiert darstellt und im nachfolgenden Abschnitt eingeführt wird.

Mit der Freigabe von Systemen mit SAE-Level 4 und 5 beschäftigen sich außerdem die aktuellen europäischen Forschungsprojekte SUNRISE [144], V4SAFETY [145] und SYNERGIES [146]. SUNRISE [144] strebt die Harmonisierung und Definition eines europaweit einheitlichen Frameworks für das szenarienbasierte Testen und die Sicherheitsargumentation automatisierter Fahrzeuge an. Das Projekt V4SAFETY [145] fokussiert sich auf die Entwicklung von Methoden zur vorausschauenden Bewertung der Auswirkungen von neu eingeführten Sicherheitsmaßnahmen. Dabei werden Maßnahmen

bezogen auf Fahrzeuge, Infrastruktur und Gesetzgebung sowie auf Fußgänger und Radfahrer betrachtet. Das zentrale Ziel des Projekts SYNERGIES [146] ist der Aufbau einer europäischen Szenariendatenbank, in der die Ergebnisse und Daten vorheriger Forschungsprojekte kombiniert und vereinheitlicht werden.

### **3.3.5 Sicherheitsargumentation als Goal Structuring Notation**

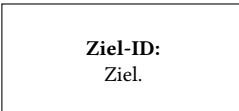
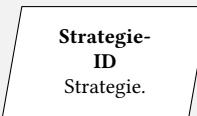
#### **3.3.5.1 Einführung**

Die Goal Structuring Notation (GSN) wurde zur strukturierten Definition und Darstellung einer Sicherheitsargumentation (engl. Safety Case) entwickelt und wird bereits in verschiedenen Kontexten eingesetzt [147]. Hierzu zählen Anwendungen in der Pharmaindustrie, dem Gesundheitswesen, der Nukleartechnik und dem Militär [148]. GSNs finden außerdem Anwendung in etablierten Standards der Automobilindustrie wie ISO 26262 und ISO 21448 (vgl. Abschnitt 2.3.4).

ISO 21448 [45] Tabelle A.1 enthält die Definitionen der verwendeten Elemente des GSN, die in dieser Dissertation aufgrund des Anwendungsfalls für die Freigabe automatisierter Fahrzeuge verwendet werden (vgl. Tabelle 3.4).

Ergänzt ist das in [149] und [147] verwendete und als Raute dargestellte Symbol für ein unentwickeltes Element (engl. undeveloped element decorator) (vgl. Tabelle 3.5). Dieses beschreibt im Rahmen der Dissertation nicht betrachtete Argumentations- und Prozessschritte und dient der Abgrenzung zu anderen Forschungsarbeiten. Aus Darstellungsgründen können umfangreiche GSNs zudem durch einen Verweis in einer weiteren Abbildung fortgesetzt werden.

**Tabelle 3.4:** In ISO 21448 verwendete Elemente der GSN [45]

<b>Symbol</b>	<b>Name</b>	<b>Beschreibung</b>
	Ziel	Ein Ziel, dargestellt als Rechteck, bezeichnet einen anspruchsbildenden Teil des Arguments.
	Strategie	Eine Strategie, dargestellt als Parallelogramm, beschreibt die Art der Verknüpfung, die zwischen einem Ziel und den unterstützenden Zielen besteht.
	Lösung	Eine Lösung oder ein Nachweis, dargestellt als Kreis, stellt einen Verweis auf ein Beweiselement dar.
	Kontext	Ein Kontext, wie links dargestellt, stellt ein kontextuelles Artefakt dar. Dabei kann es sich um einen Verweis auf Kontextinformationen oder eine Aussage handeln. Wird manchmal zur Definition von Begriffen innerhalb von Zielen oder Strategien verwendet.
	Annahme	Eine Annahme, dargestellt als Oval mit dem Buchstaben „A“ unten rechts, stellt eine absichtlich unbegründete Aussage dar.
	Unterstützt durch	Unterstützt durch, dargestellt als Linie mit einer ausgefüllten Pfeilspitze, ermöglicht die Dokumentation von Schlussfolgerungen oder Beweisbeziehungen.
	Im Kontext von	Im Kontext von, dargestellt als Linie mit einer nicht ausgefüllten Pfeilspitze, zeigt eine kontextuelle Beziehung.

**Tabelle 3.5:** In ISO 21448 [45] und [149] zusätzlich verwendete Elemente der GSN

<b>Symbol</b>	<b>Name</b>	<b>Beschreibung</b>
	Unentwickeltes Element	Ein unentwickeltes Element, dargestellt als Raute mittig unterhalb eines anderen Elements, bezeichnet einen Platzhalter für noch nicht definierte Ziele oder Strategien.
	Abbildungsverweis	Ein Abbildungsverweis, dargestellt als Raute mit einem Pluszeichen, verweist auf die Fortsetzung einer GSN in Abbildung A.X.

Der Industriestandard UL 4600 [150] wurde speziell für die Definition von Sicherheitsargumentationen mit GSNs im Rahmen der Entwicklung und Freigabe automatisierter Fahrzeuge entwickelt und wird insbesondere in den USA eingesetzt. Eine Übersicht der gesetzlichen Vorschriften in den einzelnen Bundesstaaten der USA zeigt [151]. Industrieanwendungen wurden z. B. von Waymo [51], Aurora [152] und Edge Case Research [148] präsentiert.

Zusammenfassend bilden GSN den aktuellen Stand der Technik für die Freigabeargumentation von SAE-Level 4 Fahrzeugen. Nachteilig ist hingegen, dass die in Industrieanwendungen entwickelten GSNs lediglich in einem geringen Detailgrad oder nur für einzelne Beispiele veröffentlicht wurden und sich daher nicht als Grundlage für eine Weiterentwicklung der Argumentationen im Rahmen dieser Dissertation eignen.

### 3.3.5.2 VVM-Sicherheitsargumentation

In aktuellen Forschungsprojekten hat die GSN im Rahmen des VVM-Projekts Anwendung gefunden. Reich et al. [149] setzen die GSN ein, um eine Sicherheitsargumentation für den Nachweis der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos nach ISO 21448 zu formulieren (vgl. Abb. 3.14).

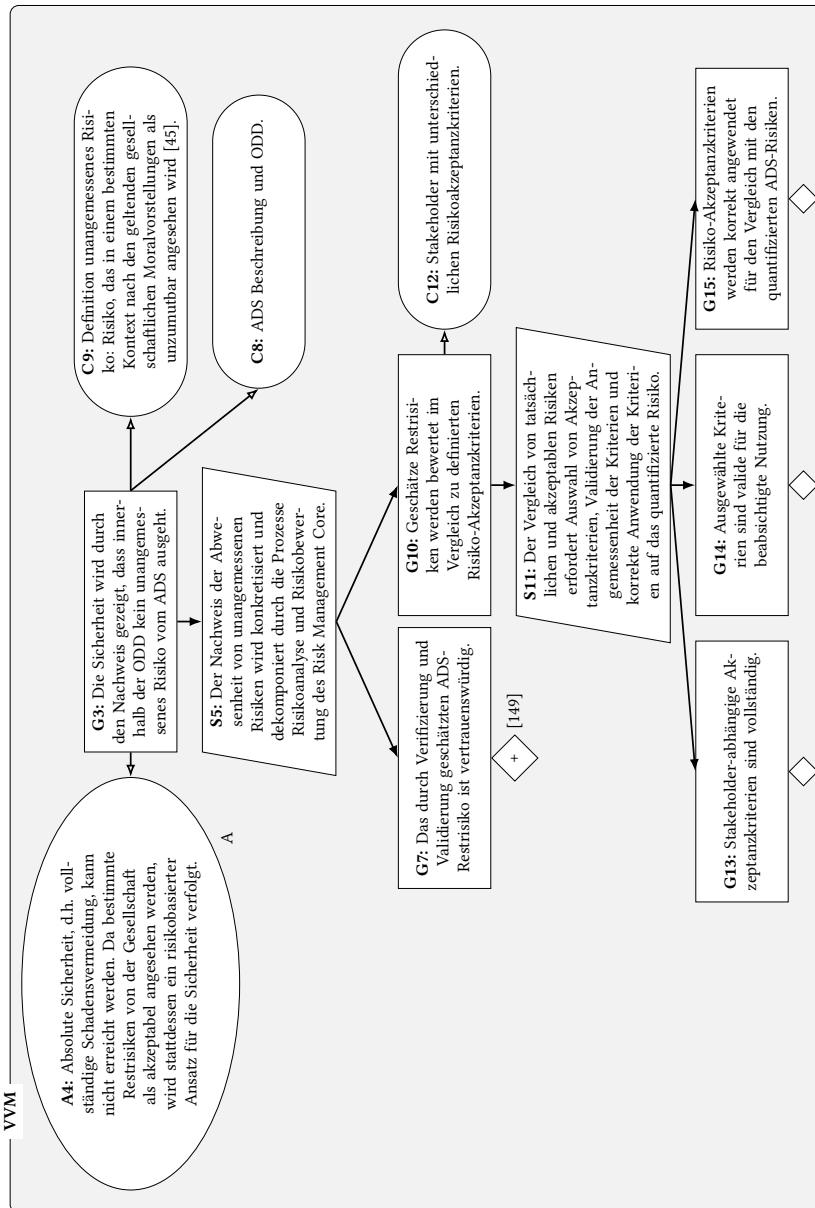


Abbildung 3.14: Auszug aus VVM-Sicherheitsargumentation als GSN [149]

Das Gesamtziel der Argumentation lautet: „Die Sicherheit wird durch den Nachweis gezeigt, dass innerhalb der ODD kein unangemessenes Risiko vom ADS ausgeht“ (Ziel G3) [149]. Annahme A4 drückt aus, dass die absolute Sicherheit eines automatisierten Fahrzeugs nicht erreicht werden kann und eine Bewertung von Restrisiken anhand von Akzeptanzkriterien für unangemessenes Risiko erfolgen muss [149]. Die Definition von unangemessenem Risiko entspricht der in dieser Dissertation verwendeten Definition nach ISO 21448 (vgl. Kontext C9 und Abschnitt 2.3.4).

Im Rahmen des VVM-Projekts lag der Fokus auf dem Einsatz des szenarienbasierten Testens als Teil einer Verifikations- und Validierungsstrategie zur Schätzung von ADS-Restrisiken (vgl. Abschnitt 3.3.4). Die hierzu notwendigen Strategien und Ziele zur Erreichung von Ziel G7, inklusive der Systemdekomposition und Gefahrenanalyse, dem Aufbau und der Validierung einer Szenariendatenbank sowie der Testorchestrierung, werden detailliert von Reich et al. in der GSN eingeführt (vgl. [149]).

Die notwendigen Schritte zur Definition und Anwendung von Risiko-Akzeptanzkriterien unterhalb von Ziel G10 werden hingegen nur auf einer weiteren Ebene detailliert. Gefordert wird die Vollständigkeit (Ziel G13), Validität (Ziel G14) und korrekte Anwendung (Ziel G15) von Risiko-Akzeptanzkriterien zum Nachweis der Abwesenheit von unangemessenem Risiko eines ADS innerhalb einer ODD. Salem et al. [153] betonen in ihrem Beitrag zum Risk Management Core die Definition von Akzeptanzkriterien als unverzichtbaren Teil gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Diskussion, betrachten diese jedoch explizit nicht.

Schlussfolgernd aus der zunehmenden Verwendung von GSNS als Basis einer strukturierten Freigabeargumentation sowohl in Forschung als auch Industrie werden in dieser Dissertation entwickelte Ansätze als GSN formuliert. Als detaillierteste öffentlich zugängliche Grundlage wurde die VVM-Sicherheitsargumentation identifiziert. Forschungsbedarf besteht insbesondere für die Definition von Risiko-Akzeptanzkriterien für unangemessenes Risiko, mit denen die VVM-Sicherheitsargumentation erweitert werden kann.

### 3.3.6 Menschliche Referenzmodelle für die Bewertung hochautomatisierter Fahrzeuge

Die Unterscheidung zwischen angemessenen und unangemessenen Risiken des Systems stellt eine zentrale Herausforderung für die Freigabeargumentation dar. Daher werden verschiedene Ansätze angewandt, wie die Entwicklung nach etablierten Standards wie ISO 26262 [25] und ISO 21448 [45]. Eine kontroverse Frage ist der Vergleich des ADS-Verhaltens mit dem menschlichen Fahrer, um angemessene Risiken im Vergleich zu manuell gesteuerten Fahrzeugen zu bewerten.

Ein fundamentales Akzeptanzkriterium zur Vermeidung von unangemessenem Risiko ist die positive Risikobilanz eines Systems, die z.B. von der deutschen Ethik-Kommission in ihrem 2017 veröffentlichten Bericht gefordert wird:

*Der Schutz von Menschen hat Vorrang vor allen anderen Nützlichkeitserwägungen. Ziel ist die Verringerung von Schäden bis hin zur vollständigen Vermeidung. Die Zulassung von automatisierten Systemen ist nur vertretbar, wenn sie im Vergleich zu menschlichen Fahrleistungen zumindest eine Verminderung von Schäden im Sinne einer positiven Risikobilanz verspricht. [154]*

Wird nur eine positive Risikobilanz gefordert, kann die Erhöhung des Restrisikos für bestimmte Gefahren zulässig sein, solange diese durch ein geringeres Restrisiko für andere Gefahren aufgewogen wird [45]. Auch im Bericht *Ethics of Connected and Automated Vehicles* [155] der von der Europäischen Union eingesetzten Expertengruppe wird die Reduktion von Schäden als ethische Empfehlung für die Entwicklung und den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen ausgesprochen.

Zur qualitativen Einordnung des menschlichen Fahrers als Vergleichspunkt haben Blumenthal et al. [50] verschiedene Interessengruppen befragt und in ihrem Bericht „Safe enough“ mehrere Sicherheitsdefinitionen abgeleitet, einschließlich der Sicherheit als Schwellenwert im Vergleich zur menschlichen Fahrleistung. Die Verwendung eines durchschnittlichen menschlichen Fahrers für die Risikobewertung wird dabei als „unbefriedigende Option erörtert,

[wohingegen] ein überdurchschnittlich guter oder sicherer menschlicher Fahrer eine vorzuziehende Alternative ist“ [50].

Die Definition und Harmonisierung einer angemessenen menschlichen Referenz für ADS sind Gegenstand eines laufenden Diskurses zwischen Forschung, Industrie, öffentlicher Berichterstattung, Regulierungsbehörden und politischen Entscheidungsträgern. Unterschiedliche Stakeholder, z. B. Original Equipment Manufacturers (OEMs), Behörden und Kunden, stellen verschiedene Erwartungen an die Sicherheit eines automatisierten Fahrzeugs. Daher spielt die klare Definition von Akzeptanzkriterien eine entscheidende Rolle zur Erreichung der gesellschaftlichen Akzeptanz von automatisierten Fahrzeugen.

In ISO 34502 [86] werden zwei mögliche Ansätze für diese Sicherheitsbewertung unter Anwendung des szenarienbasierten Testansatzes definiert:

1. **Aggregierte Bewertung:** Definition von Grenzwerten für das zulässige Risiko, z. B. anhand von zulässigen Auftretensraten von unerwünschtem Systemverhalten pro Szenario
2. **Szenarienbasierte Bewertung:** Referenzmodell zur Einzelfallbewertung der minimal notwendigen Performance in Szenarien

### 3.3.6.1 Aggregierte Bewertung

Um das ADS-Risiko auf der aggregierten Ebene zu bewerten, kann eine Methode zur Risikoschätzung verwendet werden, um konkrete Szenarien aus logischen Szenarien abzuleiten, zu simulieren und das Risiko der ausgeführten konkreten Szenarien anhand eines statistischen Modells zu aggregieren [98]. Der Ansatz erfordert die strukturierte Zerlegung der ODD des SuT in eine Szenariendatenbank sowie die Identifikation von realen Parameterverteilungen aus gesammelten Testdaten. Ein Beispiel für ein Kriterium zur Quantifizierung des Risikos ist die Kollisionsrate des Systems unter Berücksichtigung des Schätzfehlers des statistischen Modells, wie von de Gelder und Op den Camp in [156] gezeigt wurde.

Dabei kann eine geeignete Einschränkung der gesammelten Fahrdaten auf die ODD notwendig sein, um eine realistische Schätzung für den tatsächlichen Anwendungsfall des SuT zu gewährleisten. Eine mögliche Datenquelle zur Gewinnung von menschlichen Vergleichswerten bilden Unfallstatistiken, um die SuT-Leistung im Vergleich zum menschlichen Fahrer auf einer aggregierten Ebene zu bewerten. Einzelne Unfallereignisse können je nach den Methoden der Datenerhebung und dem Zweck der Analyse einbezogen oder ausgeschlossen werden [157], z. B. wenn sie außerhalb der ODD des Systems liegen.

Kauffmann et al. [110] stellen ein auf die positive Risikobilanz ausgerichtetes Framework zur Sicherstellung der Fahrzeugsicherheit vor. Das als PROACT-URL bezeichnete qualitative Framework wurde aus der Pharmaindustrie auf den Anwendungsfall von automatisierten Fahrzeugen übertragen. Für die Anwendung des Frameworks werden in [110] die Definition von adäquaten Schwellwerten während der frühen Entwicklungsphase sowie die simulationsbasierte Überprüfung der positiven Risikobilanz vor Markteinführung vorgestellt.

Während die aggregierte Bewertung eine Methode zur Sicherstellung einer positiven Risikobilanz darstellt, ist diese alleine nicht ausreichend, um ein unangemessenes Risiko gemäß ISO 21448 auszuschließen (vgl. Abschnitt 2.3.4). Der Grund hierfür ist, dass Szenarien, in denen das SuT schlechter abschneidet als der menschliche Fahrer, unbeabsichtigt in dem aggregierten Maß untergehen können. So kann der Einsatz eines ADS, das ausschließlich anhand von aggregierten Kriterien bewertet wurde, zu einem unangemessenen Risiko in für einen menschlichen Fahrer beherrschbaren Szenarien führen [51].

Ursache hierfür ist insbesondere die fehlende Berücksichtigung von unbekannten unsicheren Szenarien nach ISO 21448 bei der Definition und Implementierung des gewünschten Systemverhaltens. Wird z. B. das Auftreten von seltenen, aber möglichen Szenarien wie Fahrradfahrern auf einer Autobahn nicht berücksichtigt, kann dies zu einem unsicheren Verhalten des Systems in Szenarien führen, in denen ein menschlicher Fahrer aus Erfahrung ein besonders vorsichtiges Fahrverhalten zeigen würde. Daher wird von Favarò et al. [51] die Notwendigkeit zusätzlicher szenarienbasierter Kriterien betont,

um eine vollständige Argumentation zur Abwesenheit eines unangemessenen Risikos sicherzustellen. Damit wird gewährleistet, dass die menschliche Leistungsfähigkeit in jedem Szenario erreicht oder übertroffen wird und kein unangemessenes Risiko vorliegt, das im aggregierten Maß nicht identifiziert wurde.

### 3.3.6.2 Szenarienbasierte Bewertung

Für die szenarienbasierte Bewertung können nach ISO 34502 [86] Referenzmodelle eingesetzt werden. Die Anwendbarkeit von Referenzmodellen für menschliches Fahrverhalten wurde z. B. in [158] für ein fiktives ADAS-System gezeigt. Außerdem wurden in Forschung und Industrie verschiedene Referenzmodelle entwickelt, die nachfolgend eingeführt werden. Das Modell Responsibility Sensitive Safety (RSS) [159] (Mobileye) beschreibt anhand von formalen Regeln und mathematischen Modellen das sichere Verhalten automatisierter Fahrzeuge zur Unfallvermeidung.

Das Stochastic Cognitive Driver Model (SCM) wird seit 2014 von BMW entwickelt [160], um ein menschliches Fahrermodell für alltägliche und kritische Fahrsituationen bereitzustellen, das statistische Varianzen als Teil eines Frameworks zum Nachweis einer positiven Risikobilanz einbezieht [110]. Das SCM ist eng an das Verständnis des kognitiven Verhaltens des menschlichen Fahrers angelehnt, von der Wahrnehmung über die Entscheidungsfindung bis hin zur Umsetzung der Reaktion, und ist in mehrere Teilmodule aufgeteilt. Das Informationserfassungsmodul modelliert die Reize, die ein Fahrer aus seiner Umgebung erhält, inklusive auditiver, haptischer und visueller Wahrnehmung. Die visuelle Wahrnehmung berücksichtigt das begrenzte periphere und foveale Sichtfeld des Fahrers sowie ein stochastisch gesteuertes Blickverhalten. Diese Reize werden vom kognitiven Modell weiterverarbeitet, das die Reize in Kombination mit einer Erinnerung an frühere Zeitschritte verarbeitet, um Situationsmuster zu erkennen und Merkmale der Umgebung zu extrahieren. Der Entscheidungsprozess umfasst die Bewertung der aktuellen Situation, aus der eine Aktion abgeleitet wird. Schließlich wird die beabsichtigte Aktion in Form von Pedalstellungen und Lenkradwinkeln umgesetzt, was die

Quer- und Längsbeschleunigungen des Fahrzeugs vorgibt. Stochastische Verteilungen werden durch das Submodul der Fahrereigenschaften eingebracht, die das Modell über alle Schritte hinweg beeinflussen. Dies ermöglicht die Simulation eines Spektrums individueller Fahrer, das von vorsichtigen älteren Fahrern bis hin zu jungen und risikobereiten Fahrern reicht. Die Verteilungen dieser Merkmale werden aus Simulatorstudien abgeleitet [160], [161].

Das Unternehmen Waymo hat das Modell Non-Impaired and Eyes ON the conflict (NIEON) entwickelt, das speziell auf die szenarienbasierte Bewertung der Abwesenheit von unangemessenem Risiko als Ergänzung zur aggregierten Bewertung einer positiven Risikobilanz abzielt [51], [162]. Das NIEON-Modell ist einem unbeeinträchtigten menschlichen Fahrer nachempfunden, der seine Augen stets auf den Konflikt gerichtet hat. Auf diese Weise wird ein vorsichtiger und leistungsfähiger menschlicher Fahrer modelliert, da der Blick eines menschlichen Fahrers abgelenkt werden kann und dieser nicht allwissend ist. NIEON nutzt ein von Engström et al. [163] vorgeschlagenes Modell der menschlichen Reaktionszeit, das die Reaktionszeit auf der Grundlage des Überraschungsmoments beschreibt. Das Überraschungsmoment ist als Beobachtung von Informationen definiert, die der aktuellen Erwartung widersprechen und somit eine Aktualisierung der aktuellen Erwartung erfordern. Nach Ablauf der Reaktionszeit nach Erkennen einer notwendigen Reaktion auf andere Verkehrsteilnehmer wird das Modell mit drei verschiedenen Ausweichmanövern simuliert, die einem seitlichen Ausweichmanöver nach links oder rechts oder einer Vollbremsung entsprechen. Aus diesen Optionen wird das beste Ergebnis als Referenz für die menschliche Leistungsfähigkeit ausgewählt [164]. Das NIEON-Modell wird durch die Analyse von rekonstruierten tödlichen Unfällen und Simulationen des Modells evaluiert. Es wird gezeigt, dass in 84 % der 16 Szenarien mit notwendiger Reaktion des Modells zur Kollisionsvermeidung das Risiko einer schweren Verletzung reduziert wurde [162].

### 3.3.6.3 Safety I und Safety II

Während sich die genannten menschlichen Referenzmodelle auf die Kollisionsvermeidung in kritischen Szenarien konzentrieren, schlagen Tejada

et al. [165] eine praktisch anwendbare Methode zur Definition von kompetentem Fahrverhalten mit dem Fokus auf gesellschaftlich akzeptiertes alltägliches Fahrverhalten vor. Die Bedeutung dieser gesellschaftlichen Normen wird von Papadimitriou et al. [166] durch die Unterscheidung des Performancevergleichs zwischen automatisierten Fahrzeugen und menschlichen Fahrern in Safety I im Kontrast zu Safety II hervorgehoben. Das Konzept Safety I repräsentiert die Analyse von Unfällen oder Katastrophen mit dem Ziel, Gefahren zu identifizieren und zu vermeiden oder die Schwere von Unfällen zu reduzieren. Das in der Luftfahrt, dem Gesundheitswesen und der Verfahrenstechnik etablierte Konzept Safety II fokussiert sich hingegen auf alltägliche Situationen und Aspekte des menschlichen Fahrverhaltens, die das Auftreten von Gefahren im Vorhinein verhindern. Für den Vergleich des menschlichen Fahrers mit automatisierten Fahrzeugen sind dabei insbesondere zwei Aspekte relevant. Erstens, welches risikoreiche Verhalten von menschlichen Fahrern die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Gefahren oder Unfällen erhöht und wo sich das SuT folglich von menschlichem Fahrverhalten unterscheiden sollte. Ein Beispiel ist die strikte Einhaltung von Verkehrsregeln wie dem Geschwindigkeitslimit. Zweitens sollte das SuT hinreichend ähnliches Fahrverhalten gegenüber kompetenten menschlichen Fahrern aufweisen, wodurch das Auftreten von Gefahren reduziert werden kann, z. B. durch vorausschauendes Fahrverhalten in der Nähe von Fußgängern. Umgekehrt kann ein für umliegende Verkehrsteilnehmer unerwartetes Fahrverhalten des SuT ein Risiko darstellen.

Der Ansatz von Tejada et al. [165] extrahiert Verhaltensregeln und Empfehlungen aus Fahrerhandbüchern und formalisiert sie mithilfe von mathematischen Formeln als Nachweis (engl. assertions). Basierend auf menschlichen Fahrraten, die in einer NDS gesammelt wurden, wird die ODD als Gültigkeitsbereich des Nachweises definiert. Um Schwellenwerte für kompetentes Fahrverhalten zu extrahieren, verwenden Tejada et al. während der Versuchsfahrten gesammelte Annotationen von Fahrlehrern, um die Grenze zwischen akzeptablem und inakzeptablem Verhalten zu definieren und Schwellenwerte der mathematischen Formeln zu extrahieren. Im letzten Schritt werden die Formeln zur Eingrenzung des akzeptablen Betriebsbereichs verwendet, der ein kompetentes Fahrverhalten beschreibt [165].

### 3.3.6.4 Fahrzeugfolgemodelle

Eine Alternative zur Beschreibung von Verkehrsregeln mit mathematischen Formeln gemäß des Safety II Konzepts ist die Parametrisierung kontinuierlicher Fahrermodelle mit Fokus auf alltägliches Fahrverhalten. Eine in den letzten Jahrzehnten detailliert untersuchte Kategorie von Fahrermodellen stellen makroskopische Fahrzeugfolgemodelle dar, die für die Verkehrsflusssimulation eingesetzt werden. Mit der Entwicklung von mikroskopischen Verkehrsmodellen haben diese insbesondere für die Simulation von Staubildung und ACC-Systemen Anwendung gefunden [167]. Mikroskopische Modelle bieten den Vorteil, des Verhaltens von einzelnen Fahrzeugen abzubilden, die in einer übergeordneten Simulationsumgebung miteinander interagieren.

Das Wiedemann-Modell [168] beschreibt das Fahrzeugverhalten über eine hohe Zahl an Parametern, die außerdem für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche separat kalibriert werden müssen. Die stochastischen Modelle nach Gipps [169] und Krauss [170] sind trotz einer vereinfachten Beschreibung in der Lage, ein realistisches Fahrverhalten mit unterschiedlichem Brems- und Beschleunigungsverhalten abzubilden. Nicht realistisch abgebildet werden können hingegen instabile Verkehrssituationen, die zu einer Staubildung führen [171].

#### Intelligent Driver Model (IDM)

Im Folgenden wird das weit verbreitete Intelligent Driver Model (IDM) von Treiber et al. [171] eingeführt. Ausgehend von den Limitierungen der vorherigen Modelle wurde das IDM zur realistischen Abbildung von instabilen Verkehrssituationen bei hoher Verkehrsdichte und resultierenden Staus entwickelt. Das IDM kann mehrere Aspekte des einspurigen Fahrzeugfolgeverhaltens abbilden, einschließlich der Beschleunigung auf einer freien Straße ohne vorausfahrendes Fahrzeug, der Annäherung an ein langsameres oder stehendes Führungsfahrzeug, und der aktiven Modulation der Geschwindigkeit während der Folgefahrt [171].

Die Inputs des IDM umfassen die Längsgeschwindigkeit  $v$  des Ego-Fahrzeugs, die relative Längsgeschwindigkeit  $\Delta v$  sowie den Abstand von Stoßstange zu

Stoßstange  $s$  zwischen Ego- und Führungsfahrzeug. Die Modellparameter umfassen die maximale Beschleunigung  $a$ , die Komfortverzögerung  $b$ , den Beschleunigungs-Exponenten  $\delta$ , den Mindestabstand  $s_0$  im Stillstand und den gewünschten Zeitabstand  $T_0$  zum Führungsfahrzeug sowie die gewünschte Ego-Geschwindigkeit  $v_0$  bei Freifahrt.

Die Beschleunigung  $\dot{v}$  des IDM wird berechnet als:

$$\dot{v} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

Der gewünschte dynamische Abstand  $s^*$  berücksichtigt den Gleichgewichtsterm  $s_0 + vT_0$  und den dynamischen Term  $v\Delta v/(s\sqrt{ab})$ , der über die beiden Beschleunigungsparameter  $a$  und  $b$  das „intelligente“ Brems- und Beschleunigungsverhalten des Modells beschreibt.

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left( 0, vT_0 + \frac{v\Delta v}{s\sqrt{ab}} \right) \quad (3.2)$$

Ein wesentlicher Vorteil des IDM ist die intuitive Bedeutung der verwendeten Parameter. Auf diese Weise können z. B. ein aggressiver oder defensiver Fahrer beschrieben werden (vgl. Tabelle 3.6).

**Tabelle 3.6:** Beispiel für IDM-Parameter eines aggressiven und defensiven Fahrers nach [167]

	$a[\text{m s}^{-2}]$	$b[\text{m s}^{-2}]$	$\delta[-]$	$s_0[\text{m}]$	$T_0[\text{s}]$	$v_0[\text{m s}^{-1}]$
Aggressiv	4.0	1.5	4.0	2.0	0.8	55.0
Defensiv	0.5	1.5	4.0	2.0	3.0	28.0

### Modellkalibrierung

Für die Kalibrierung von Fahrermodellen anhand von gesammelten Fahrdaten können verschiedene Optimierungsalgorithmen wie z. B. Sequential Quadratic Programming (SQP) oder genetische Algorithmen eingesetzt werden [171].

Ein Optimierungsalgorithmus, der speziell für das betrachtete IDM entwickelt wurde, ist der von Li et al. [172] vorgeschlagene globale Optimierungsalgorithmus DIRECT-SQP zur Kalibrierung der Parameter des IDM anhand aufgezeichneter Fahrdaten. Um eine Konvergenz zur globalen optimalen Lösung zu garantieren, wird zuerst eine direkte Suche mit dem Algorithmus DIming RECTangles (DIRECT) verwendet, um die globale optimale Lösung der Zielfunktionen zu finden. Für eine effiziente Optimierung und um das Problem der langsamen Konvergenzgeschwindigkeit des DIRECT-Algorithmus um das globale Optimum herum zu vermeiden, wird im zweiten Schritt auf die SQP umgeschaltet, um die lokale optimale Lösung zu finden. Eine detaillierte Einführung in den Optimierungsansatz findet sich in [172]. Aufgrund der Kombination der Vorteile der globalen und lokalen Optimierung wird der DIRECT-SQP nachfolgend für die Kalibrierung des IDM verwendet.

Als Zielfunktion wird die Summe der quadratischen Geschwindigkeitsfehler zwischen der aufgezeichneten Geschwindigkeit  $v$  und der simulierten Geschwindigkeit  $\hat{v}$  gewählt.  $N$  ist die Anzahl der Zeitschritte, und  $M$  ist die Anzahl der für die Kalibrierung verwendeten Szenarien. Die kalibrierten Parameter  $\theta = [a, b, \delta, s_0, T_0, v_0]$  ergeben sich als Lösung des Optimierungsproblems:

$$\min_{\theta} g(\theta) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (v_i - \hat{v}_i(\theta))^2 \quad (3.3)$$

Alternativ kann der gleiche Ansatz auch auf andere Zielfunktionen wie den Zeitabstand oder die in [173] vorgeschlagene Sicherheitszielfunktion angewendet werden.

### Berechnung von Konfidenzintervallen mit Bootstrapping

Der verwendete globale Optimierungsansatz liefert keine Informationen über die Unsicherheit der kalibrierten optimalen Lösung. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung anderer Optimierungsansätze wie der Bayes-Optimierung dar, die ein Maß für die Unsicherheit der kalibrierten Modellparameter liefern. Unabhängig vom verwendeten Optimierungsansatz kann die erstmals

von Efron [174] vorgestellte Bootstrapping-Methode verwendet werden, um die Verteilung der Parameter des Fahrzeugfolgemodells zu schätzen [175]. Aus dem ursprünglichen Datensatz werden wiederholt Stichproben mit Zurücklegen gezogen, bis der neu gesampelte Datensatz die gleiche Anzahl an Stichproben wie der ursprüngliche Datensatz aufweist. Liegt bspw. ein Datensatz mit 500 Datenpunkten vor, werden 500 Stichproben mit Zurücklegen gezogen, sodass der Bootstrapping-Datensatz ebenfalls 500 Datenpunkte enthält. Die globale optimale Lösung wird für jeden neu gesampelten Datensatz mithilfe des zuvor beschriebenen DIRECT-SQP-Optimierungsansatzes berechnet, bis die gewünschte Anzahl von Stichproben erreicht ist. Auf der Grundlage der geschätzten Verteilungen werden 95 %-Konfidenzintervalle für die IDM-Parameter berechnet. Das 95 %-Konfidenzintervall bedeutet in diesem Fall, dass bei einer Wiederholung der Stichprobe 95 % aller Stichproben innerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls liegen würden. Ausgehend von gesammelten Fahrdaten kann mit dem beschriebenen Ansatz das IDM kalibriert werden und zusätzlich eine Aussage über die Unsicherheit der resultierenden Parameter getroffen werden.

### 3.3.6.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend sind für die Bewertung des SuT zwei Dimensionen zu berücksichtigen. Erstens erfordert die Argumentation der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos nach ISO 21448 die Kombination der aggregierten Bewertung im Sinne einer positiven Risikobilanz und der szenarienbasierten Bewertung durch Anwendung von menschlichen Referenzmodellen [51]. Während der Fokus der meisten Referenzmodelle auf der Risikobewertung bezüglich der Vermeidung von Unfällen liegt, betrachten aktuelle Arbeiten zusätzlich alltägliches Fahrverhalten und soziale Erwartungen an ein ADS als zweite Dimension eines umfassenden Vergleichs des Systems zum menschlichen Fahrer (Safety II). Neben den beschriebenen Modellen hat die Verwendung eines expliziten menschlichen Referenzmodells erstmals Einzug in die Anforderungen für die Zulassungsvorschriften von ALKS nach SAE-Level 3 gefunden und wird daher im nächsten Kapitel evaluiert.



## **4 Abgeleitete Herausforderungen und Konsequenzen**

Für Systeme mit SAE-Level 4 existieren zurzeit keine für die Zulassung vorgeschriebenen Referenzmodelle für den szenarienbasierten Nachweis der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos. Für ALKS mit SAE-Level 3 wurden in UN-Regelung Nr. 157 erstmals für die Zulassung verpflichtende szenarienbasierte Referenzmodelle definiert. Daher werden nachfolgend die Referenzmodelle aus UN-Regelung Nr. 157 evaluiert und Anforderungen sowie Randbedingungen für einen neuen Prozess zur Freigabeargumentation für Systeme mit SAE-Level 4 abgeleitet.

### **4.1 Referenzmodelle aus UN-Regelung Nr. 157**

Die UN-Regelung Nr. 157 [19] für ALKS nach SAE-Level 3 aus dem Jahr 2020 definiert ein Performance-Modell eines menschlichen Fahrers. Mit der Erweiterung im Jahr 2022 („01 series of amendments“) [176] wurde mit dem Fuzzy Safety Model (FSM) ein zweites Referenzmodell hinzugefügt. Seit dem 4. Januar 2023 ist die Regelung in ihrer vierten Änderung gültig [177]. Die erste Version [19] bezieht sich nur auf Fahrzeuge der Klasse M<sup>1</sup>. Mit der ersten Änderung der Verordnung fällt auch die Klasse N<sup>2</sup> in den Geltungsbereich der Verordnung. Die Vorschriften gelten für die Typgenehmigung in den 56 Vertragsstaaten, darunter die Staaten der EU, das Vereinigte Königreich und

---

<sup>1</sup> „Kategorie M - Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern, die zur Beförderung von Personen eingesetzt werden“ [178]

<sup>2</sup> „Kategorie N - Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern, die zur Güterbeförderung eingesetzt werden“ [178]

Japan [179]. Die USA sind jedoch kein Mitgliedsstaat, sodass die Verordnung für ein dortiges Typgenehmigungsverfahren nicht bindend ist.

ALKS im Rahmen von [177] sind definiert als ein System, das das Fahrzeug „durch Steuerung der Längs- und Querbewegungen des Fahrzeugs über einen längeren Zeitraum innerhalb seiner Fahrspur hält, ohne dass weitere Eingaben des Fahrzeugführers notwendig sind“ und wird daher als SAE-Level 3 System eingestuft. Die ODD des ALKS ist so festgelegt, dass es Geschwindigkeiten von 0 bis  $130 \text{ km h}^{-1}$  auf Straßen umfasst, auf denen Radfahrer und Fußgänger verboten sind, und eine physische Trennung der entgegenkommenden Fahrbahnen gegeben ist [177].

Hinsichtlich der Systemsicherheit wird die Anforderung definiert:

„Das aktivierte System darf keine nach vernünftigem Ermessen vorhersehbaren und vermeidbaren Zusammenstöße verursachen. Kann ein Zusammenstoß sicher verhindert werden, ohne dass ein weiterer Zusammenstoß verursacht wird, ist er zu verhindern.“ [177]

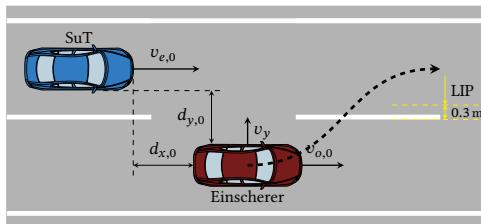
Zur Bewertung der Sicherheit des ALKS werden drei logische Szenarien definiert, bei denen Bedingungen auftreten können, die zu einer unvermeidbaren Kollision führen.

1. **Einscherszenario:** Ein Fahrzeug von einer benachbarten Fahrspur wechselt auf die Fahrspur, die vom ALKS-Fahrzeug befahren wird.
2. **Ausscherszenario:** Ein Fahrzeug verlässt die vom ALKS-Fahrzeug befahrene Fahrspur, wodurch ein zuvor verdecktes, langsameres Fahrzeug auf der Fahrspur des ALKS-Fahrzeugs sichtbar wird.
3. **Bremsszenario:** Ein Fahrzeug vor dem ALKS-Fahrzeug bremst ab, während es auf der gemeinsamen Fahrspur bleibt.

Die definierten Parameter der drei Szenarien umfassen die Straßengeometrie, das Verhalten der anderen Fahrzeuge sowie die Umweltbedingungen. Daher werden bei der Beschreibung dieser Szenarien nur die Schichten 1, 4 und 5 des

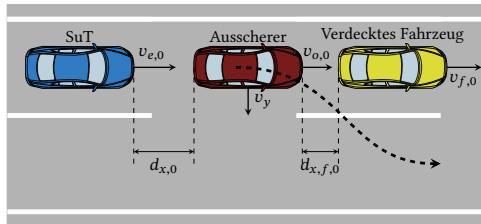
6-Schichten-Modells berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.2.2), während für die übrigen Schichten grundlegende Annahmen über die Betriebsbedingungen getroffen werden.<sup>1</sup>

Alle Szenarien teilen sich den Parameterraum für die Straßengeometrie, unterscheiden sich aber in den Bewegungsparametern der beteiligten Fahrzeuge. Das in Abb. 4.1 dargestellte Einscherszenario ist durch eine konstante Geschwindigkeit  $v_{o,0}$  und  $v_y$  des einscherenden Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung sowie den anfänglichen Längsabstand  $d_{x,0}$  zum ALKS-Fahrzeug gekennzeichnet. Das Ausscherszenario (vgl. Abb. 4.2) definiert eine konstante Längs- und Quergeschwindigkeit  $v_{o,0}$  und  $v_y$  für das ausscherende Fahrzeug, während das anfangs verdeckte Fahrzeug mit einer konstanten Längsgeschwindigkeit  $v_{f,0}$  fährt. Die Ausgangsposition ist von den Abständen  $d_{x,0}$  zwischen ALKS-Fahrzeug und ausscherendem Fahrzeug sowie  $d_{x,f,0}$  zwischen ausscherendem Fahrzeug und anfangs verdecktem Fahrzeug abhängig. Das Abbremszenario ist der einzige Fall, in dem die Längsgeschwindigkeit der beteiligten Fahrzeuge variiert. Für die Abbremsung des Fahrzeugs wird der maximale Ruck  $dG/dt$  angewendet, bis die maximale Verzögerung  $G_{x,max}$  erreicht ist, welche bis zum Stillstand konstant gehalten wird (vgl. Abb. 4.3). Da es sich um ein Notbremsmanöver handelt, wird der maximale Ruck durch das Bremsvermögen des Fahrzeugs und nicht durch die Komfortanforderungen eines menschlichen Fahrers oder Insassen begrenzt.

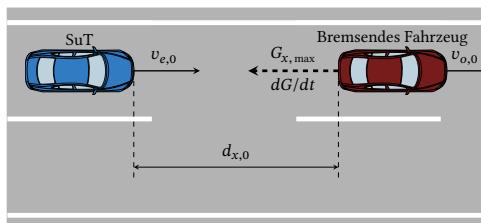


**Abbildung 4.1:** Einscherszenario mit dem ALKS-Fahrzeug (blau) und dem einscherenden Fahrzeug (rot)

<sup>1</sup> Eine detaillierte Übersicht der Parameter findet sich in Abschnitt A.1.



**Abbildung 4.2:** Ausscherszenario mit dem ALKS-Fahrzeug (blau), dem ausscherenden Fahrzeug (rot) und dem anfangs verdeckten Fahrzeug (gelb)



**Abbildung 4.3:** Bremsszenario mit dem ALKS-Fahrzeug (blau) und dem bremsenden Fahrzeug (rot)

Ausgehend von den drei berücksichtigten, potenziell kritischen Szenarien werden in [177] drei Methoden zur Unterscheidung vermeidbarer und nicht vermeidbarer Szenarien definiert und in den folgenden Abschnitten erläutert.

#### 4.1.1 TTC Metrik

Absatz 5.2.5.2 der UN-Regelung Nr. 157 [177] definiert für das Einscherszenario (vgl. Abb. 4.1), dass ein Zusammenstoß mit einem einscherenden und langsamer fahrenden Fahrzeug vermieden werden muss, wenn

1. das einscherende Fahrzeug seine Längsgeschwindigkeit beibehält,
2. die seitliche Bewegung des einfahrenden Fahrzeugs mindestens 0.72 s lang sichtbar war, bevor das einfahrende Fahrzeug den Lane Intrusion Point (LIP) erreicht hat,

3. die TTC zwischen dem ALKS-Fahrzeug und dem einscherenden Fahrzeug am LIP die Bedingung in Gleichung (4.1) erfüllt.

$$TTC_{LIP} > \frac{v_{rel}}{2 \cdot 6 \text{ m s}^{-2}} + 0.35 \text{ s}, \quad (4.1)$$

$$TTC_{LIP} = \frac{v_{rel,LIP}}{d_{lon,LIP}}, \quad (4.2)$$

Der LIP ist definiert als der Punkt, an dem die Außenseite des Reifens, der der Fahrbahnmarkierung am nächsten ist, mehr als 0.3 m über die Außenkante der sichtbaren Fahrbahnmarkierung hinausragt (vgl. Abb. 4.1).  $v_{rel}$  ist die relative Geschwindigkeit zwischen den beiden Fahrzeugen und positiv, wenn das ALKS-Fahrzeug schneller als das einscherende Fahrzeug fährt.  $v_{rel,LIP}$  und  $d_{lon,LIP}$  sind definiert als die relative Geschwindigkeit und der innere Längsabstand, wenn das einscherende Fahrzeug den LIP erreicht.

In der Definition wird davon ausgegangen, dass ein menschlicher Fahrer 0.35 s nach Erreichen des LIP durch das einscherende Fahrzeug reagieren würde und sofort eine Bremsung mit mindestens  $6 \text{ m s}^{-2}$  einleitet. Sind die Bedingungen von Gleichung (4.1) gegeben, reicht diese Bremsreaktion aus, um eine Kollision zu verhindern.

### 4.1.2 Modell eines geübten menschlichen Fahrers

In Anlage 3 der UN-Regelung Nr. 157 wird ein zweites Modell beschrieben, um zwischen vermeidbaren und unvermeidbaren Kollisionen zu unterscheiden. Das Competent and Careful Human Driver Model (CCHD)-Modell basiert auf in der japanischen Unfallforschung verwendeten Parametern zur Charakterisierung menschlicher Reaktionen [180]. Die menschliche Reaktion wird als binärer Zustand modelliert, wobei entweder nicht auf eine Situation reagiert wird oder nach einer definierten Verzögerung ein Notfallbremsmanöver durchgeführt wird. Abb. 4.4 veranschaulicht die modellierte Reaktion eines „geübten und aufmerksamen“ (engl. „competent and careful“) menschlichen Fahrers, bestehend aus den drei Abschnitten „Wahrnehmung“, „Entscheidung“ und „Reaktion“.

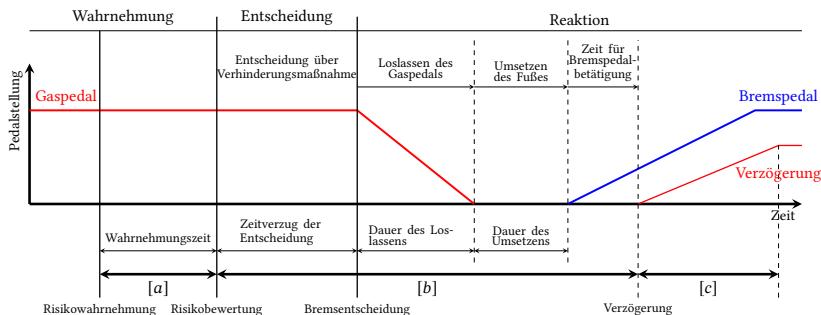


Abbildung 4.4: Modell der Reaktionszeiten eines CCHD [180]

Der Zeitpunkt *Risikowahrnehmung* ist definiert als der Moment, an dem ein Risiko, wie z. B. die seitliche Bewegung eines einscherenden Fahrzeugs, auftritt. Nach der *Wahrnehmungszeit*  $a$  des menschlichen Fahrermodells beginnt die *Risikobewertung*, in der über eine Verhinderungsmaßnahme entschieden wird. Mit der *Bremsentscheidung* beginnt die Durchführung eines Notbremsmanövers. Das Manöver umfasst das Loslassen des Gaspedals, das Umsetzen des Fußes vom Gaspedal auf das Bremspedal sowie die Zeitverzögerung zwischen dem Betätigen des Bremspedals und dem Einsetzen der Verzögerung des Fahrzeugs. Diese Schritte werden als Parameter  $b$  des Reaktionsmodells zusammengefasst. Die Verzögerung wird als linear ansteigend modelliert, bis die maximale Verzögerung nach der Zeit  $c$  erreicht ist.

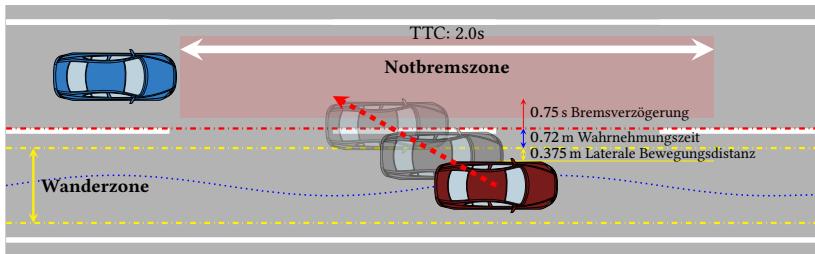
Der Parameter  $b$  wurde mit 0.75 s festgelegt, da dieser Wert in Japan von Strafverfolgungsbehörden und Gerichten als Reaktionszeit eines Fahrers verwendet wird [180]. Der Parameter  $c$  wurde in einer Feldstudie mit geübten und normalen Fahrern als 0.6 s ermittelt, um die maximale Verzögerung zu erreichen. In der Studie wurde für geübte Fahrer eine Verzögerung mit maximal  $7.6 \text{ m s}^{-2} = 0.774 \text{ G}$  bestimmt. Nach den Regelungen von Automated Emergency Braking (AEB)-Systemen in UN-Regelung Nr. 152 für PKW wird nach Aktivierung des AEB-Systems eine maximale Verzögerung von  $8.34 \text{ m/s}^2 = 0.85 \text{ G}$  erreicht, wobei gute Straßenverhältnisse und eine ebene Oberfläche vorausgesetzt werden [181]. Für die maximale Bremsverzögerung des Fahrzeugs mit AEB wird in der Erweiterung der UN-Regelung Nr. 157 [176] für

Fahrzeuge der Klasse M keine Unterscheidung zwischen Fahrzeugen der Klassen N (Passagierbeförderung) und M (Gütertransport) [178] vorgenommen.

Der Parameter  $a$  des Reaktionsmodells wurde experimentell in einer Fahrsimulatorstudie bestimmt. Elf Teilnehmer fuhren das gleiche Szenario mehrmals, und die Reaktionszeiten zum Betätigen des Bremspedals wurden aufgezeichnet. Der Versuch basiert auf der Annahme, dass ein vorkonditionierter Teilnehmer bei wiederholter Versuchsdurchführung des gleichen Szenarios keine Wahrnehmungszeit  $a$  benötigt, da er das Risiko vorhersehen kann. Folglich wird die Wahrnehmungszeit  $a$  als Differenz der Gesamtreaktionszeit zwischen dem ersten und den nachfolgenden Versuchen angenähert, woraus ein Wert von 0.4 s resultiert [180]. Die drei Parameter werden für das Reaktionsmodell verwendet, das für die drei Szenarien spezifisch ist und nachfolgend eingeführt wird.

#### 4.1.2.1 Einscherszenario

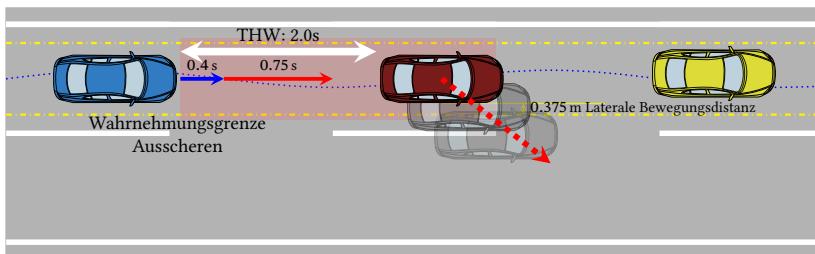
Für das Einscherszenario aus Abb. 4.1 wird für das CCHD-Modell als Risiko definiert, sobald das einscherende Fahrzeug (rot) die um die Fahrbahnmitte zentrierte Wanderzone in Richtung der Fahrbahn des nachfolgenden Fahrzeugs (blau) verlässt (vgl. Abb. 4.5). Die Breite der Wanderzone wurde als das 50. Perzentil der beobachteten Fahrspurwanderung in einer NDS mit 0.75 m festgelegt [180]. Die Grenze der Risikowahrnehmung wird als seitliche Schwelle definiert, die das einscherende Fahrzeug überschreiten muss. Abgeleitet von der Wahrnehmungszeit  $a$  und einer angenommenen lateralen Geschwindigkeit von  $1.8 \text{ m s}^{-1}$  wird die Risikowahrnehmungsgrenze 0.72 m außerhalb der Wanderzone festgelegt. Wenn die TTC für das nachfolgende Fahrzeug (blau) beim Überschreiten der Risikowahrnehmungsgrenze durch das einscherende Fahrzeug (rot) kleiner als 2 s ist, beginnt das CCHD-Modell nach einer Bremsverzögerung  $b$  von 0.75 s mit der Umsetzung des Bremsmanövers.



**Abbildung 4.5:** Einscherszenario mit Parametern des CCHD-Modells für das ALKS-Fahrzeug (blau) und einscherende Fahrzeug (rot)

#### 4.1.2.2 Ausscherszenario

Die Modellreaktion im Ausscherszenario (vgl. Abb. 4.2) wird für das CCHD-Modell auf ähnliche Weise definiert (vgl. Abb. 4.6). Das Szenario wird mit einer THW von  $THW = \frac{d_{x,0}}{v_{e,0}} = 2 \text{ s}$  zwischen SuT und ausscherendem Fahrzeug initialisiert (vgl. Abb. 4.2), da dies der minimale sichere Folgeabstand ist, der in Verkehrsvorschriften wie [182] für die Fahrzeugfolgefahrt vorgegeben wird. Sobald das vorausfahrende Fahrzeug (rot) die Wanderzone und damit die Fahrspur des ALKS (blau) verlässt, kann das Risiko durch das zweite vorausfahrende und zuvor als vollständig verdeckt angenommene Fahrzeug (gelb) wahrgenommen werden. Zu diesem Zeitpunkt beginnt die Risikowahrnehmungszeit  $a$  von 0,4 s, nach der die Situation bewertet und nach der Reaktionszeit  $b$  von 0,75 s ein Bremsmanöver eingeleitet wird.



**Abbildung 4.6:** Ausscherszenario mit Parametern des CCHD-Modells für das ALKS-Fahrzeug (blau), ausscherende (rot) und verdeckte Fahrzeug (gelb)

### 4.1.2.3 Bremsszenario

Für das Bremsszenario (vgl. Abb. 4.3) wird derselbe Anfangsabstand zum vor-  
ausfahrenden Fahrzeug mit einer THW von 2 s angenommen (vgl. Abb. 4.7).  
Der Risikowahrnehmungspunkt wird als der Zeitpunkt definiert, an dem die  
Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs den Schwellenwert von  $5 \text{ m s}^{-2}$   
überschreitet [177].

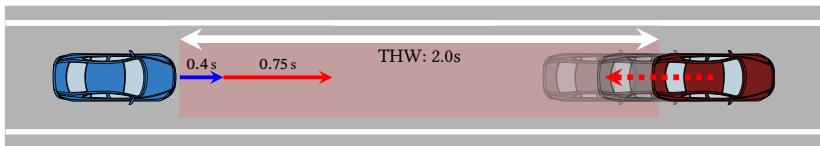
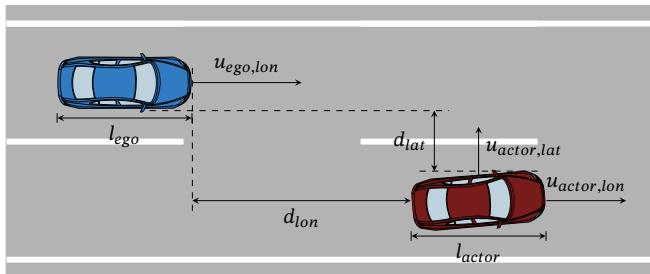


Abbildung 4.7: Bremsszenario mit Parametern des CCHD-Modells für das ALKS-Fahrzeug (blau) und vorausfahrende Fahrzeug (rot)

### 4.1.3 Fuzzy Safety Modell

Mit der Überarbeitung der UN-Regelung Nr. 157 im Jahr 2022 [176] wurde in Anlage 3 ein zweites Referenzmodell hinzugefügt. Das FSM wurde von Mattas et al. [183] vorgeschlagen und basiert auf der Kombination verschiedener Surrogate Safety Metrics (SSMs), die als Kritikalitätsmetriken eingesetzt werden können (vgl. Abschnitt 3.2.3). Die Motivation hinter diesem Referenzmodell ist die verbesserte Modellierung des menschlichen Fahrverhaltens gegenüber dem CCHD-Modell. Während das CCHD-Modell nur binär zwischen keiner Reaktion und einem Notbremsmanöver entscheidet, kann das FSM eine proaktive und modulierte Reaktion umsetzen und ein Risiko vorausschauend de-  
eskalieren.

Das FSM verwendet eine Reihe von kinematischen und geometrischen Werten, um die Interaktionen zwischen dem Modell (auch als Ego- oder ALKS-Fahrzeug bezeichnet) und einem sich in dieselbe Richtung bewegenden Akteur zu beschreiben (vgl. Abb. 4.8 und Tabelle 4.1).



**Abbildung 4.8:** Überblick über die vom FSM verwendeten kinematischen und geometrischen Werte des ALKS-Fahrzeugs (blau) und eines weiteren Fahrzeugs (rot)

**Tabelle 4.1:** Beschreibung der vom FSM verwendeten kinematischen und geometrischen Werte [177]

Variable	Einheit	Beschreibung
$u_{ego,lon}$	[m s <sup>-1</sup> ]	Geschwindigkeit des ALKS-Fahrzeugs in Längsrichtung der Straße
$u_{actor,lon}$	[m s <sup>-1</sup> ]	Geschwindigkeit des Akteurs in Längsrichtung der Straße
$u_{actor,lat}$	[m s <sup>-1</sup> ]	Geschwindigkeit des Akteurs in lateraler Richtung zur Straße
$d_{lon}$	[m]	Vorzeichenbehafteter longitudinaler Abstand in Längsrichtung. Positiv, wenn die hintere Stoßstange des Akteurs vor dem ALKS-Fahrzeug steht
$d_{lat}$	[m]	Lateraler Abstand in Querrichtung der Fahrbahn
$l_{ego}$	[m]	Gesamtlänge des ALKS-Fahrzeugs
$l_{actor}$	[m]	Länge des Akteurs in Längsrichtung

Zusätzlich werden Modellparameter verwendet, die das Verhalten des Modells charakterisieren (vgl. Tabelle 4.2). Die Parameter und Variablen werden zur Berechnung zweier SSMs eingesetzt, aus denen ein Reaktionsmodell abgeleitet wird.

**Tabelle 4.2:** FSM-Modellparameter [177]

Parameter	Einheit	Beschreibung
$b_{ego,comf}$	[m s <sup>-2</sup> ]	Komfortverzögerung des Modells
$b_{ego,max}$	[m s <sup>-2</sup> ]	Maximale Verzögerung des Modells
$j_{max}$	[m s <sup>-2</sup> ]	Maximaler Längsruck des Modells
$b_{actor,max}$	[m s <sup>-2</sup> ]	Maximale Abbremsung des Akteurs
$\tau$	[s]	Gesamtreaktionszeit des Modells
$d_1$	[m]	Sicherheitsabstand beim Stillstand der Fahrzeuge
$s_1$	[s]	Zusätzlicher zeitlicher Sicherheitsabstand

#### 4.1.3.1 Proactive Fuzzy Surrogate Safety Metric

Die Proactive Fuzzy Surrogate Safety Metric (PFS) basiert auf der von Vanholme et al. definierten Regel für sichere Folgeabstände [184]:

„Der Abstand zwischen Fahrzeugen muss so groß sein, dass ein Zusammenstoß vermieden werden kann, wenn ein Fahrzeug eine Notbremsung durchführt.“ [184]

Die sichere Folgedistanz  $d_{safe}$  berechnet sich folglich als Differenz des Anhaltewegs bei maximaler Verzögerung  $b_{actor,max}$  des Akteurs und einer Komfortverzögerung  $b_{ego,comf}$  des Ego-Fahrzeugs, zusätzlich zum in der Reaktionszeit  $\tau$  mit der Geschwindigkeit  $u_{ego,lon}$  zurückgelegten Strecke des Ego-Fahrzeugs und dem Mindestsicherheitsabstand von  $d_1$  (vgl. Gleichung (4.3)). Als unsichere Folgedistanz  $d_{unsafe}$  wird die Differenz des Anhaltewegs definiert, bei dem das Modell nach der Reaktionszeit seine volle Bremsfähigkeit  $b_{ego,max}$  ohne Mindestsicherheitsabstand ausnutzt (vgl. Gleichung (4.4)).

$$d_{safe} = u_{ego,lon}\tau + \frac{u_{ego,lon}^2}{2b_{ego,comf}} - \frac{u_{actor,lon}^2}{2b_{actor,max}} + d_1 \quad (4.3)$$

$$d_{unsafe} = u_{ego,lon}\tau + \frac{u_{ego,lon}^2}{2b_{ego,max}} - \frac{u_{actor,lon}^2}{2b_{actor,max}} \quad (4.4)$$

Die abgeleitete PFS lautet:

$$PFS(d_{lon}) = \begin{cases} 1, & 0 < d_{lon} - d_1 < d_{unsafe} \\ 0, & d_{lon} - d_1 > d_{safe} \\ \frac{d_{lon} - d_{safe} - d_1}{d_{unsafe} - d_{safe}}, & d_{unsafe} < d_{lon} - d_1 < d_{safe} \end{cases} \quad (4.5)$$

Der Wert von PFS ist definiert als die Zugehörigkeitsvariable zur Fuzzy-Menge in Gleichung (4.5) in Abhängigkeit vom inneren Fahrzeugabstand  $d_{lon}$ . Daher ist der Wert der PFS-Metrik 0.0 für Abstände größer als  $d_{safe} + d_1$  und 1.0 für Abstände kleiner als  $d_{unsafe} + d_1$ . Die Werte zwischen  $d_{safe} + d_1$  und  $d_{unsafe} + d_1$  werden linear interpoliert. Damit erlaubt die PFS-Metrik anders als das CCHD eine nicht-binäre und modulierte Reaktion.

#### 4.1.3.2 Critical Fuzzy Surrogate Safety Metric

In ähnlicher Weise ist die Critical Fuzzy Surrogate Safety Metric (CFS) um den Begriff des Verkehrskonflikts nach Güttinger [185] definiert:

**Definition Verkehrskonflikt:** Ein Verkehrskonflikt ist eine beobachtbare Situation, in der sich zwei oder mehr Verkehrsteilnehmer räumlich und zeitlich so weit annähern, dass bei unveränderter Bewegung die Gefahr eines Zusammenstoßes besteht. [185]

Für eine gegebene Situation bezeichnet  $a_{ego}$  den aktuellen Beschleunigungswert des ALKS-Fahrzeugs. Der modifizierte Beschleunigungswert  $a'_{ego}$  begrenzt die Beschleunigung auf eine Komfortbremsung mit  $-b_{ego,comf}$ .  $u_{ego,lon,NEXT}$  ergibt sich als Längsgeschwindigkeit des ALKS-Fahrzeugs nach der Reaktionszeit  $\tau$ . Dabei wird eine konstante Beschleunigung  $a'_{ego}$  angenommen.

$$a'_{ego} = \max(a_{ego}, -b_{ego,comf}) \quad (4.6)$$

$$u_{ego,lon,NEXT} = u_{ego,lon} + a'_{ego}\tau \quad (4.7)$$

Nach der Reaktionszeit  $\tau$  resultiert die erwartete Abstandsänderung  $d_{new}$  zwischen dem Akteur und dem ALKS-Fahrzeug unter der Annahme der selben konstanten Beschleunigung und einer konstanten Geschwindigkeit  $u_{actor,lon}$  des Akteurs.

$$d_{new} = \left( \frac{u_{ego,lon} + u_{ego,lon,NEXT}}{2} - u_{actor,lon} \right) \tau. \quad (4.8)$$

Die Abstände  $d_{safe}$  und  $d_{unsafe}$  sind davon abhängig, ob  $u_{ego,lon,NEXT}$  größer oder kleiner als die Geschwindigkeit des Akteurs  $u_{actor,lon}$  ist (vgl. Gleichung (4.9) und Gleichung (4.10)). Falls das ALKS-Fahrzeug innerhalb der Reaktionszeit auf die oder unter die Geschwindigkeit des Akteurs abbremsen kann, sind der sichere und der unsichere Abstand gleich. Dann ändert sich der Abstand so lange, bis die Geschwindigkeiten von ALKS-Fahrzeug und Akteur unter Annahme der modifizierten Beschleunigung  $a'_{ego}$  gleich sind. Reicht die modifizierte Beschleunigung  $a'_{ego}$  nicht aus, um innerhalb der Reaktionszeit auf die Geschwindigkeit des Akteurs abzubremsen ( $u_{ego,lon,NEXT} > u_{actor,lon}$ ), ist  $d_{safe}$  die Abstandsänderung bei einem nach der Reaktionszeit  $\tau$  eingeleiteten Bremsmanöver unter Verwendung von  $b_{ego,comf}$ . In diesem Fall schätzt  $d_{unsafe}$  die Abstandsänderung bei der Durchführung eines Bremsmanövers mit  $b_{ego,max}$ . In allen Fällen wird eine konstante Geschwindigkeit  $u_{actor,lon}$  des Akteurs während des Bremsmanövers angenommen.

$$d_{safe} = \begin{cases} \frac{(u_{ego,lon} - u_{actor,lon})^2}{2a'_{ego}}, & u_{ego,lon,NEXT} \leq u_{actor,lon} \\ d_{new} + \frac{(u_{ego,lon,NEXT} - u_{actor,lon})^2}{2b_{ego,comf}}, & u_{ego,lon,NEXT} > u_{actor,lon} \end{cases}, \quad (4.9)$$

$$d_{unsafe} = \begin{cases} \frac{(u_{ego,lon} - u_{actor,lon})^2}{2a'_{ego}}, & u_{ego,lon,NEXT} \leq u_{actor,lon} \\ d_{new} + \frac{(u_{ego,lon,NEXT} - u_{actor,lon})^2}{2b_{ego,max}}, & u_{ego,lon,NEXT} > u_{actor,lon} \end{cases}, \quad (4.10)$$

Für den Fall, dass der Akteur langsamer als das Ego-Fahrzeug fährt ( $u_{ego} > u_{Akteur}$ ), ergibt sich daraus die Definition der CFS als:

$$CFS(d_{lon}) = \begin{cases} 1, & 0 < d_{lon} < d_{unsafe} \\ 0, & d_{lon} \geq d_{safe} \\ \frac{d_{lon}-d_{safe}}{d_{unsafe}-d_{safe}}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.11)$$

Analog zur PFS beträgt die CFS-Metrik 0.0 für Abstände größer als  $d_{safe}$  und 1.0 in Fällen für Entfernungen kleiner als  $d_{unsafe}$ . Die Werte zwischen  $d_{safe}$  und  $d_{unsafe}$  werden linear interpoliert.

#### 4.1.3.3 Performance Referenzmodell

Anhand der PFS und CFS definieren Mattas et al. [183] ein Simulationsmodell, das in UN-Regelung Nr. 157 als menschliches Referenzmodell eingesetzt wird und dessen Bremsreaktion durch die Fuzzy-Metriken definiert ist [177]. Das Vorgehen zur Bestimmung einer Reaktion des FSM wird mit einem Aktivitätsdiagramm modelliert (vgl. Abb. 4.9).

Im ersten Schritt wird mit der lateralen Sicherheitsprüfung ermittelt, ob sich die Trajektorien eines Akteurs und des Modells an einem zukünftigen Punkt seitlich überschneiden. Fährt der Akteur langsamer als das Modell, wird Gleichung (4.12) ausgewertet. Dies ist der einzige von der Verordnung berücksichtigte Fall, da die Definition aller Szenarien voraussetzt, dass der Akteur langsamer als das Modell ist, da nur in diesem Fall ein Verkehrskonflikt eintritt [177]. Mattas et al. [183] formulieren zusätzlich die laterale Sicherheitsprüfung für den Fall, dass ein Akteur schneller ist als das Modell (vgl. Gleichung (4.13)).

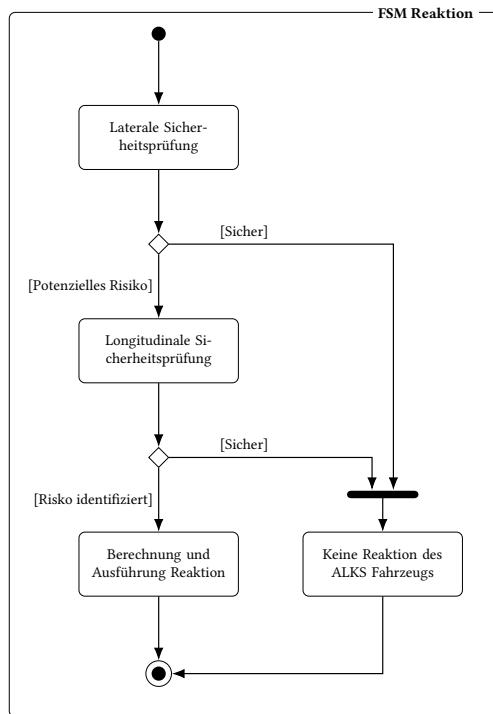


Abbildung 4.9: Aktivitätsdiagramm des FSM basierend auf [177]

$$\frac{d_{lat}}{u_{actor,lat}} < \frac{d_{lon} + l_{ego} + l_{actor}}{u_{ego,lon} - u_{actor,lon}} + s_1, \quad (4.12)$$

$$\frac{d_{lat}}{u_{actor,lat}} < \frac{-d_{lon}}{u_{ego,lon} - u_{actor,lon}} + s_1, \quad (4.13)$$

$$\Rightarrow TTC_{lat} < TTC_{lon} + s_1. \quad (4.14)$$

Beide Fälle können analog anhand von Gleichung (4.14) interpretiert werden. Die linke Seite der Ungleichung ermittelt die TTC (allgemein definiert als  $TTC = \frac{d_{rel}}{\Delta v}$ ) in der lateralen Richtung für ein seitlich unbewegtes SuT.

Die rechte Seite der Ungleichung kann als TTC in der longitudinalen Richtung interpretiert werden, wobei der Abstand von Stoßstange zu Stoßstange plus einem zusätzlichen Sicherheitspufferzeit  $s_1 = 0.1$  verwendet wird.

Ist die Ungleichung für die laterale Sicherheitsprüfung erfüllt, wird ein potenzielles Risiko identifiziert und im zweiten Schritt die longitudinale Sicherheitsprüfung durchgeführt. Die longitudinale Sicherheitsprüfung besteht aus den beiden SSMs PFS und CFS. Ist die PFS oder CFS größer als 0, wird ein Risiko identifiziert und eine Reaktion des Modells ist notwendig, um in einen sicheren Zustand zurückzukehren. Die Reaktion des Modells ist proportional zu den Werten der Fuzzy-SSMs und wird mit Gleichung (4.15) berechnet:

$$b_{react}(d_{lon}) = \begin{cases} CFS(d_{lon}) \cdot (b_{ego,max} - b_{ego,comf}) + b_{ego,comf}, & CFS > 0 \\ PFS(d_{lon}) \cdot b_{ego,comf}, & CFS = 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

Der Wert der PFS wird verwendet, um eine Bremsreaktion zwischen 0 und  $b_{comf}$  abzubilden, während der Wert der CFS eine Reaktion zwischen  $b_{comf}$  und  $b_{max}$  vorgibt. Die auszuführende Reaktion wird durch den maximalen Ruck  $j_{max}$  begrenzt und erfolgt nach einer Reaktionszeit von  $\tau$  nach der ersten Reaktion gemäß Gleichung (4.16). Dabei ist  $t_0$  der erste Zeitpunkt, zu dem sowohl die laterale als auch die longitudinale Sicherheitsprüfung ein Risiko identifizieren:

$$b_{impl}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_0 + \tau \\ \min(b_{impl}(t - \Delta t) + j_{max} \cdot \Delta t, b_{react}(t)), & t > t_0 + \tau \end{cases} \quad (4.16)$$

Für die Anwendung des FSM auf die drei in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen ALKS-Szenarien gelten einige zusätzliche Vorgaben [177]. Für das Einscherverszenario ist das Modell wie beschrieben anwendbar. Beim Ausscher- und Abbremszenario wird die seitliche Sicherheitsprüfung ignoriert, da der

Verkehrskonflikt innerhalb der Fahrspur des ALKS-Fahrzeugs auftritt. Darüber hinaus kann das ALKS-Fahrzeug im Ausscherszenario auf das anfangs verdeckte Fahrzeug reagieren, sobald das ausscherende Fahrzeug die Wanderzone verlässt, die analog zum CCHD-Modell als eine Abweichung von 0.375 m von der Fahrbahnmitte definiert ist.

#### 4.1.4 Evaluierung der Modelle

Für den Vergleich der Referenzmodelle TTC-Metrik, CCHD und FSM für die in UN-Regelung Nr. 157 definierten Szenarien stellen Mattas et al. [183] ein Simulationsframework bereit<sup>1</sup>. Zu diesem Zweck werden konkrete Szenarien aus den logischen Szenarien generiert, indem eine Teilmenge der für das Szenario relevanten Parameter abgetastet wird [183]. Eine detaillierte Übersicht der Parameter findet sich in Abschnitt A.1. Anschließend wird eine Simulation der Referenzmodelle für das konkrete Szenario durchgeführt und überprüft, ob das jeweilige Modell eine Kollision verhindern konnte.

##### 4.1.4.1 Einscherszenario

Zur Evaluierung des Einscherszenarios werden vier Parameter variiert (vgl. Tabelle 4.3 und Abb. 4.1). Der anfängliche seitliche Abstand  $d_{y,0}$  wird auf 1.6 m festgelegt. Wie in [183] wird angenommen, dass sich die Fahrbahnmarkierungen genau in der Mitte der beiden Fahrzeuge befinden.

**Tabelle 4.3:** Parameterbereiche des Einscherszenarios

Parameter	Minimum	Maximum	Schrittweite
$d_{x,0}$	1 m	120 m	2 m
$v_y$	$0.1 \text{ m s}^{-1}$	$1.8 \text{ m s}^{-1}$	$0.1 \text{ m s}^{-1}$
$v_{e,0}$	$10 \text{ km h}^{-1}$	$130 \text{ km h}^{-1}$	$10 \text{ km h}^{-1}$
$v_{o,0}$	$10 \text{ km h}^{-1}$	$v_{e,0}$	$10 \text{ km h}^{-1}$

<sup>1</sup> <https://github.com/ec-jrc/JRC-FSM>

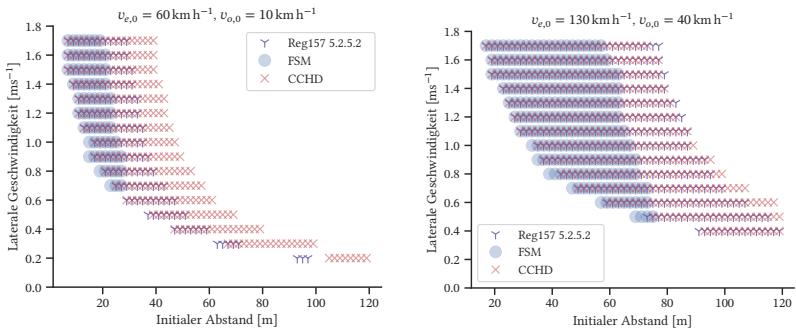
Zusätzlich zum FSM- und CCHD-Modell wird für das Einscherszenario die TTC Metrik verglichen (vgl. Abschnitt 4.1.1). Für 80.8 % (79.373 Nicht-Kollisionen und 6.719 Kollisionen) der generierten Szenarien stimmt die Klassifizierung aller drei Modelle überein (vgl. Tabelle 4.4). In 6.760 Szenarien kollidiert das FSM-Modell nicht, während mindestens eines der beiden anderen Modelle kollidiert ist. Andererseits enthalten lediglich 287 Szenarien eine Kollision des FSM-Modells, während mindestens eines der beiden anderen Modelle nicht kollidiert ist.

**Tabelle 4.4:** Anzahl der Kollisionen pro Modell für das ALKS-Einscherszenario

Metrik FSM	CCHD	Keine Kollision		Kollision	
	TTC	Keine Kollision	Kollision	Keine Kollision	Kollision
Keine Kollision	79373	591	5141	6169	91274
Kollision	268	19	0	6719	7006
$\Sigma$	79641	610	5141	12888	98280

Die Bereiche der Kollisionen für jedes Modell über einen Ausschnitt des Parameterraums für das Einscherszenario mit niedrigen Geschwindigkeiten (Abb. 4.10a) und hohen Geschwindigkeiten (Abb. 4.10b) werden in Abb. 4.10 gegenübergestellt. Die magentafarbenen „Y“-förmigen Markierungen stellen konkrete Szenarien dar, in denen anhand der TTC Metrik (Absatz 5.2.5.2 in [177]) eine Kollision nicht verhindert werden konnte. Die roten „X“-Markierungen zeigen nicht vermeidbare Kollisionen des CCHD-Modells, und die blauen kreisförmigen Markierungen die Kollisionen des FSM.

Anhand des dargestellten Parameterraums wird deutlich, dass die vom FSM-Modell als nicht vermeidbar klassifizierten Kollisionsszenarien überwiegend in den vom TTC-Modell ermittelten Kollisionsszenarien enthalten sind. Darüber hinaus sind die vom TTC-Modell als nicht vermeidbar klassifizierten Szenarien bis auf wenige Ausnahmen eine Teilmenge der vom CCHD-Modell identifizierten Kollisionsszenarien.



(a) Niedrige Geschwindigkeit:  
 SuT-Geschwindigkeit von  $60 \text{ km h}^{-1}$  und  
 Geschwindigkeit des einscherenden  
 Fahrzeugs von  $10 \text{ km h}^{-1}$

(b) Hohe Geschwindigkeit:  
 SuT-Geschwindigkeit von  $130 \text{ km h}^{-1}$  und  
 Geschwindigkeit des einscherenden  
 Fahrzeugs von  $40 \text{ km h}^{-1}$

**Abbildung 4.10:** Kollisionsregionen der Modelle für das Einscherszenario bei niedriger und hoher Geschwindigkeit

In Grenzfällen kann es durch eine stärkere Bremsung eines Modells zu einer seitlichen Kollision mit dem einscherenden Akteur kommen, während bei einer geringeren Bremsung das Modell den einscherenden Aktor bereits passiert hat, bevor es zu einer Kollision kommt. Dieses Verhalten erklärt die Kollisionsregion am linken Grenzbereich, in dem allein das FSM eine Kollision verursacht.

#### 4.1.4.2 Ausscherszenario

Für das Ausscherszenario werden drei Parameter variiert (vgl. Tabelle 4.5 und Abb. 4.2). Der initiale Abstand zum ausscherenden Fahrzeug wird wie zuvor als der in [177] definierte sichere Folgeabstand der Modelle festgelegt. Das anfangs verdeckte Fahrzeug wird als stationär angenommen, was die kritischste Variante des Szenarios darstellt.

**Tabelle 4.5:** Parameterbereich des Ausscherszenarios

Parameter	Minimum	Maximum	Schrittweite
$v_{e,0}, v_{o,0}$	10 km h <sup>-1</sup>	130 km h <sup>-1</sup>	10 km h <sup>-1</sup>
$v_y$	0.1 m s <sup>-1</sup>	3.1 m s <sup>-1</sup>	0.2 m s <sup>-1</sup>
$d_{x,f,0}$	2 m	152 m	5 m

Die Kollisionsbereiche der verschiedenen Modelle können mithilfe einer Kreuztabelle evaluiert werden (vgl. Tabelle 4.6).

**Tabelle 4.6:** Anzahl der Kollisionen pro Modell für das ALKS-Ausscherszenario

CCHD FSM	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
Keine Kollision	5790	11	5801
Kollision	1	48	49
$\Sigma$	5791	59	5850

Von den 5.850 generierten Szenarien enthalten 5.790 keine Kollisionen, weder mit dem CCHD-Modell noch mit dem FSM. In 48 Fällen war keines der beiden Modelle in der Lage, eine Kollision zu verhindern. In elf Fällen übertraf das FSM das CCHD-Modell, indem es eine Kollision verhinderte. In einem Fall konnte das CCHD-Modell eine Kollision gegenüber dem FSM verhindern.

#### 4.1.4.3 Bremsszenario

Für das Bremsszenario werden zwei Parameter variiert (vgl. Tabelle 4.7 und Abb. 4.3).

**Tabelle 4.7:** Parameterbereich des Bremsszenarios

Parameter	Minimum	Maximum	Schrittweite
$v_{e,0}, v_{o,0}$	12 km h <sup>-1</sup>	130 km h <sup>-1</sup>	2 km h <sup>-1</sup>
$G_{x,\max}$	0.05 G	1 G	0.05 G

Das SuT und das vorausfahrende Fahrzeug werden dabei mit der gleichen Geschwindigkeit  $v_{e,0}$  und  $v_{o,0}$  initialisiert, und die Bremsbeschleunigung  $G_{x,\max}$  des vorausfahrenden Fahrzeugs variiert. Der initiale Abstand zwischen den Fahrzeugen wird für das jeweilige Modell über den in [177] definierten sicheren Abstand festgelegt. Für das CCHD-Modell gilt eine initiale THW von 2 s, während der Anfangsabstand des FSM-Modells mit  $d_{safe,PFS}$  definiert wird (vgl. Gleichung (4.3)). Für das Bremsszenario führt keines der 1121 generierten konkreten Szenarien zu einer Kollision des CCHD- oder FSM-Modells mit dem Akteur (vgl. Tabelle 4.8).

**Tabelle 4.8:** Anzahl der Kollisionen pro Modell für das ALKS-Bremsszenario

CCHD \ FSM	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
Keine Kollision	1121	0	1121
Kollision	0	0	0
$\Sigma$	1121	0	1121

#### 4.1.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass für das Bremsszenario sowohl das CCHD-Modell als auch das FSM keine Kollisionen im zulässigen Parameterraum verursachen. Im Ausscherszenario kann es zu nicht vermeidbaren Kollisionen für beide Modelle kommen, wobei das FSM mit 0.17 Prozentpunkten weniger Kollisionen eine vergleichbare Performance gegenüber dem CCHD-Modell aufweist. Für das Einscherszenario zeigt das FSM die geringste Anzahl an Kollisionen, da es nur 38.9 % der Kollisionen gegenüber dem CCHD-Modell und 51.9 % der Kollisionen gegenüber dem TTC-Modell verursacht. Folglich wurden mit der Einführung des FSM als zusätzlichem Referenzmodell die Anforderungen an die Systemsicherheit eines ALKS nach SAE-Level 3 mit der Aktualisierung der UN-Regelung Nr. 157 erhöht [177].

## 4.2 Herausforderungen und Problemstellung für die Freigabe hochautomatisierter Nutzfahrzeuge

Der dargestellte Stand der Technik und Wissenschaft zeigt, dass es zurzeit keine in Industrie und Forschung etablierte Lösung für die Freigabe hochautomatisierter Fahrzeuge im Open World Kontext gibt. Daher werden nachfolgend Anforderungen und Randbedingungen abgeleitet, die sich für die Freigabeargumentation im Vergleich zum menschlichen Fahrer und die Berücksichtigung von Realdaten ergeben.

### 4.2.1 Anforderungen an Prozess zur Freigabeargumentation

#### A1: Konformität des Prozesses mit dem szenarienbasierten Testansatz

Der szenarienbasierte Testprozess stellt den Stand der Technik für den Test von Fahrerassistenz- und Automatisierungssystemen dar (vgl. Abschnitt 3.2). Daher wird die Konformität des Prozesses für die Freigabeargumentation mit dem szenarienbasierten Testprozess als Anforderung definiert. Zentrale zu berücksichtigende Aspekte sind die Nutzung von bestehenden Testplattformen inklusive simulationsbasierten XiL-Umgebungen (vgl. Abschnitt 3.1.3), die strukturierte Beschreibung von Szenarien (vgl. Abschnitt 3.2.1 und Abschnitt 3.2.2) sowie die Verwendung etablierter Metriken zur Testfallbewertung (vgl. Abschnitt 3.2.3).

#### A2: Übertragbarkeit auf verschiedene Testumgebungen

Eines der Ziele des VVM-Projekts war eine effiziente Testdurchführung mit einer durchgängigen Orchestrierung von Testfällen auf verschiedene Testumgebungen (vgl. Abschnitt 3.3.4). Daraus ergibt sich die Randbedingung der Anwendbarkeit des Prozesses in verschiedenen XiL-Umgebungen. Grundsätzlich sind auch Realtests auf dem Prüfgelände möglich. Wie jedoch z. B. in [213]

diskutiert wird, bieten simulationsbasierte Methoden eine effiziente Testumgebung, um das skalierte szenarienbasierte Testen zu ermöglichen.

### **A3: Integration des Prozesses in Freigabeargumentation für hochautomatisierte Fahrzeuge**

Aufbauend auf dem szenarienbasierten Testprozess wurde insbesondere im VVM-Projekt die Definition einer umfassenden Freigabeargumentation für hochautomatisierte Fahrzeuge angestrebt (vgl. Abschnitt 3.3.4). Notwendig ist dafür die nachverfolgbare Zuordnung von Nachweisen aus den Verifikations- und Validierungsmethoden zu den Anforderungen des Betriebskonzepts. Die Einordnung in die als GSN formalisierte VVM-Sicherheitsargumentation (vgl. Abschnitt 3.3.5) muss für den entwickelten Prozess gezeigt werden. Als Einordnung wird dabei die Integration der Schritte und Artifakte des entwickelten Prozesses in die Argumentationsstruktur als GSN verstanden.

### **A4: Definition von gesellschaftlich akzeptierten Akzeptanzkriterien basierend auf dem menschlichen Fahrer zur Bewertung des Systemverhaltens in durchgeführten Testfällen**

Die Definition von quantitativen Akzeptanzkriterien im Open World Kontext ist ein elementarer Bestandteil der Freigabeargumentation hochautomatisierter Fahrzeuge und Gegenstand aktueller Forschung (vgl. Abschnitt 3.3.6). Zurzeit existiert kein in Industrie und Wissenschaft etabliertes Vorgehen für die Festlegung der Akzeptanzkriterien im Vergleich zur Leistungsfähigkeit des menschlichen Fahrers [50] [51]. Hierzu müssen die Kriterien als quantitativ auswertbare Metrik formuliert werden, um als Nachweis innerhalb einer Freigabeargumentation zu dienen. Ein Ansatz zur Definition von messbaren Kriterien basiert auf aggregierten Akzeptanzkriterien wie der positiven Risikobilanz eines Systems, die z. B. von der deutschen Ethik-Kommission [154] gefordert wird (vgl. Abschnitt 3.3.6.1). Einen weiteren Ansatz stellen szenarienbasierte Referenzmodelle dar (vgl. Abschnitt 3.3.6.2), wie das Wirkungsmodell eines „geübten und aufmerksamen menschlichen“ Fahrers in der UN-Regelung Nr. 157 [177] für ALKS (vgl. Abschnitt 4.1). Für den Nachweis der

Abwesenheit von unangemessenem Risiko nach ISO 21448 ist die Kombination von Akzeptanzkriterien für das aggregierte und das szenarienbasierte Verhalten des SuT notwendig (vgl. Abschnitt 3.3.6.5). Beide Maße erfordern eine geeignete Datengrundlage oder ein Modell für die Definition der Akzeptanzkriterien, um sowohl die Beschreibung der menschlichen Leistungsfähigkeit als auch die Bewertung des Systemverhaltens in durchgeföhrten Testfällen zu ermöglichen.

#### **A5: Anwendbarkeit des Prozesses für kritische Realdaten**

Der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen im Open World Kontext führt zu einer kombinatorischen Testfalloexplosion, die eine skalierbare Methode für die Definition und den Test von Szenarien erfordert (vgl. Abschnitt 3.2). Für die in Anforderung 4 beschriebene Definition von Akzeptanzkriterien ist eine repräsentative Berücksichtigung von Realdaten erforderlich, die Informationen über kritische und sicherheitsrelevante Szenarien enthalten (vgl. Abschnitt 3.3.3.2). Diese Daten werden im Rahmen der Dissertation als kritische Realdaten bezeichnet und dienen als Grundlage zur Ermittlung der innerhalb der ODD auftretenden kritischen Szenarien und Parametergrenzen sowie der Ableitung einer auf menschlichen Fahrern basierenden Referenz. Mit der Einbindung von kritischen Realdaten wird außerdem explizit die in ISO 21448 [45] geforderte Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von unbekannten Szenarien mit potenziell unsicherem Verhalten (vgl. Abb. 2.4) adressiert.

#### **A6: Verfügbarkeit und Qualität von Fahrdaten**

Für die Anwendung von datenbasierten Entwicklungsmethoden ist eine adäquate Qualität und Verfügbarkeit der Daten erforderlich (vgl. Abschnitt 3.3.2). Als zentrale Grundlage der klassischen Fahrzeugentwicklung dienen reale Fahrdaten, die durch mit Sensorik ausgestattete Versuchsfahrzeuge aufgezeichnet werden. Im Rahmen des szenarienbasierten Testprozesses dienen zusätzliche Datenquellen der Ergänzung eigener Fahrdaten und dem Aufbau einer Szenariendatenbank (vgl. Tabelle 3.1). Ausgehend von Anforderung 5 müssen die verwendeten Daten kritische Szenarien abdecken, was eine zusätzliche Herausforderung aufgrund der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit darstellt (vgl. Abschnitt 3.3.2.2).

Die notwendige Form der Daten hängt zudem vom betrachteten SuT ab, z. B. durch die höheren Speicher- und Qualitätsansprüche von Sensorrohdaten für die Entwicklung von Perzeptionsalgorithmen gegenüber der Aufzeichnung von Objektlisten für den funktionalen Test von Verhaltenssoftware.

#### **4.2.2 Randbedingungen des Prozesses für hochautomatisierte Nutzfahrzeuge**

##### **R1: System under Test**

Im Rahmen dieser Dissertation werden Nutzfahrzeuge mit SAE-Level 4 betrachtet, die innerhalb einer definierten ODD ohne menschlichen Fahrer an Bord eingesetzt werden sollen. Aufgrund der Einschränkung der ODD auf bestimmte Betriebsbedingungen und dem Ausschluss des Einsatzes in z. B. bestimmten Wetterbedingungen, handelt es sich dabei noch nicht um SAE-Level 5. Aktuell verfügbare Systeme im Nutzfahrzeugbereich erreichen SAE-Level 2 mit gleichzeitiger Längs- und Querführung durch die Systeme ACC und ALKS [186]. Durch den Wegfall des menschlichen Fahrers als Rückfallebene ergeben sich wesentliche Unterschiede gegenüber heutigen Serienfahrzeugen. Insbesondere erhöht sich die notwendige Verfügbarkeit des Systems, da in Szenarien mit hoher Kritikalität und geringer Auftretenswahrscheinlichkeit ein sicheres Verhalten des SuT ohne Eingriff eines menschlichen Fahrers nachgewiesen werden muss.

Bisher für den Kunden erlebbare Anforderungen wie der Fahrkomfort, die Kabinengestaltung oder Infotainmentsysteme verlieren hingegen an Bedeutung. Weiterhin sicherheitsrelevant ist die für Fahrerassistenzsysteme wichtige Mensch-Maschine-Schnittstelle zwischen System und Fahrer, solange in der Entwicklungsphase ein Sicherheitsfahrer (vgl. engl. In-Vehicle Fallback Test Driver (IFTD)) eingesetzt wird. Dies wird u. a. in den vom Automated Vehicle Safety Consortium (AVSC) [187] veröffentlichten Empfehlungen für Auswahl, Training und Aufsicht von Sicherheitsfahrern [112] adressiert.

## R2: Validität von simulationsbasierten Testumgebungen

Für einen belastbaren Beitrag von simulationsbasierten Methoden ist die Validierung der verwendeten Testumgebungen notwendig. Hierzu zählt u. a. die Validierung der verwendeten Sensor-, Steuergeräte- und Fahrzeugmodelle [188] [189] [190].

## 4.3 Zusammenfassung und Fazit

Im Open World Kontext für hochautomatisierte Fahrzeuge mit SAE-Level 4 gibt es trotz Bemühungen in Industrie und Forschung (z. B. VVM) noch keine etablierte Absicherungsstrategie oder Freigabeargumentation. Den Stand der Technik und Forschung stellt das szenarienbasierte Testen sowie die Formulierung einer Sicherheitsargumentation als GSN dar. Insbesondere die Verwendung des menschlichen Fahrers als Referenz für die notwendige Sicherheit eines Systems ist eine offene Forschungsfrage für die gesellschaftliche Akzeptanz und die Definition neuer Zulassungsvorschriften von automatisierten Systemen. Daher wird ein Ansatz benötigt, um basierend auf dem menschlichen Fahrer eine solche Referenz als Akzeptanzkriterium zu definieren und in die Freigabeargumentation zu integrieren.

# 5 Neuer Prozess zur strukturierten Freigabeargumentation hochautomatisierter Nutzfahrzeuge

## 5.1 Entwicklung des Prozesses

Basierend auf den in Abschnitt 4.2 formulierten Anforderungen an die Freigabeargumentation hochautomatisierter Nutzfahrzeuge wird der folgende Prozess definiert. Ausgehend von den in Abschnitt 1.3 gestellten Forschungsfragen werden drei Strategien zur Beantwortung der Forschungsfrage abgeleitet, die zudem der Einordnung in die Freigabeargumentation als GSN (vgl. Abschnitt 3.3.5) dienen. Hieraus resultieren die drei in Abb. 5.1 dargestellten Hauptschritte des Prozesses. Anschließend werden die Prozessschritte weiter unterteilt und in den nachfolgenden Abschnitten detailliert eingeführt.

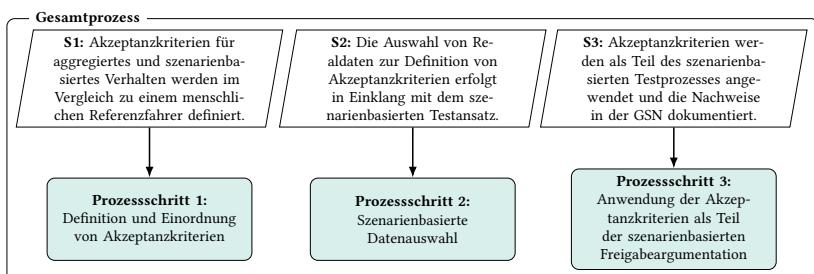


Abbildung 5.1: Neuer Prozess zur Freigabeargumentation hochautomatisierter Nutzfahrzeuge

### **5.1.1 Prozessschritt 1: Definition und Einordnung von Akzeptanzkriterien**

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 ist zuerst eine standardisierte Notation zur Strukturierung der Freigabeargumentation notwendig. Für die strukturierte Dokumentation können grundsätzlich verschiedene Notationen basierend auf etablierten Entwicklungsprozessen wie dem V-Modell (vgl. Abschnitt 2.3.1) und den entwickelten Methoden aktueller Forschungsprojekte zur Freigabe automatisierter Fahrzeuge eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.3.1). In Abschnitt 3.3.5 wurde die GSN eingeführt, die bereits in Standards wie ISO 21448 und Forschungsprojekten wie VVM zur Formalisierung der Freigabeargumentation automatisierter Fahrzeuge verwendet wird (vgl. Anforderung 3). Daher wird die GSN für die strukturierte Darstellung der entwickelten Freigabeargumentation ausgewählt.

Als zweiter Teil zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein Ansatz zum Vergleich des SuT mit dem menschlichen Fahrer vorgeschlagen. Das Ziel von Prozessschritt 1 ist die Definition von Akzeptanzkriterien, die ein gesellschaftlich akzeptables Restrisiko beschreiben (vgl. Anforderung 4). Dabei sind die Akzeptanzkriterien notwendig, um eine umfassende Argumentation der Abwesenheit von unangemessenem Risiko gemäß ISO 21448 zu führen. Hierfür wird die Leistungsfähigkeit des menschlichen Fahrers als Referenz zur Bewertung des Systemverhaltens des SuT herangezogen. Dieser Ansatz wird im Folgenden als menschlicher Referenzfahrer bezeichnet und erfolgt in zwei Teilschritten (vgl. Abb. 5.2).

Wie in Abschnitt 3.3.6 herausgestellt wurde, ist die alleinige Verwendung von Akzeptanzkriterien für das aggregierte Verhalten (z. B. positive Risikobilanz) nicht ausreichend. Dies kann dazu führen, dass unangemessene Risiken in einzelnen Szenarien, die für einen menschlichen Fahrer kontrollierbar wären, durch Szenarien mit geringem Risiko aufgewogen werden. Daher wird die Unterscheidung von Akzeptanzkriterien für aggregiertes und szenarienbasiertes Verhalten explizit in Strategie S1 gefordert. Die Unterteilung dient außerdem der Einordnung von Akzeptanzkriterien in eine GSN als Teil der Freigabeargumentation.

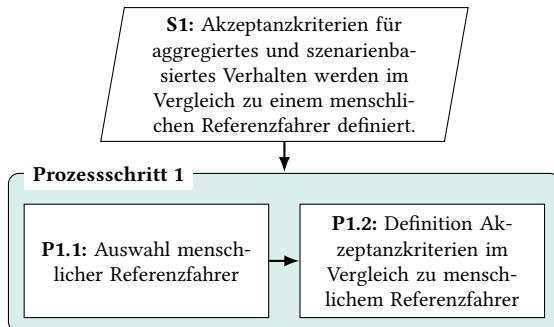


Abbildung 5.2: Prozessschritt 1

### P1.1: Auswahl menschlicher Referenzfahrer

Basierend auf dem betrachteten hochautomatisierten Fahrzeug als SuT sowie der aus dem Anwendungsfall für den Betrieb des Systems (z. B. Roboter-Taxi oder Hub zu Hub Warentransport) abgeleiteten ODD-Definition als Kontext wird im ersten Schritt ein menschlicher Referenzfahrer ausgewählt.

Im Rahmen des Prozesses wird die Auswahl des Referenzfahrers nicht eingeschränkt. Grundsätzlich existieren verschiedene Alternativen für mögliche menschliche Referenzfahrer. Eine Möglichkeit stellen durchschnittliche Fahrer dar, die jedoch meist als „unbefriedigende“ Option beschrieben werden (vgl. Abschnitt 3.3.6). Eine andere Möglichkeit stellen ausgewählte Personengruppen als Referenzfahrer dar, wie z. B. ein Fahrschüler mit den zum Bestehen der Fahrprüfung notwendigen Fähigkeiten, ein erfahrener Fahrlehrer oder ein für die sichere Straßenerprobung eingesetzter IFTD.

Basierend auf Abschnitt 6.5 in ISO 21448 ist das primäre Ziel der Auswahl des Referenzfahrers, Akzeptanzkriterien basierend auf der *Leistungsfähigkeit eines sich vorbildlich verhaltenden Fahrers* zu definieren [45]. Konkret definiert werden kann ein vorbildlicher Fahrer einerseits über den Ausschluss bestimmter Verhaltensweisen wie Ablenkung, überhöhter Geschwindigkeit oder Fahren unter Alkoholeinfluss. Andererseits kann ein geübter und aufmerksamer Fahrer über kognitive Eigenschaften wie die Wahrnehmung von

Risiken und die Reaktionszeit als Teil eines Fahrermodells beschrieben werden. Die konkrete Festlegung dieser Kriterien erfolgt abhängig vom betrachteten Anwendungsfall und wird als Nachweis (vgl. Abschnitt 3.3.5) in der GSN dokumentiert.

- **Kontext:** SuT und ODD Definition
- **Nachweis:** Definition des menschlichen Referenzfahrers

### P1.2: Definition Akzeptanzkriterien

Ausgehend von dem ausgewählten Referenzfahrer werden Akzeptanzkriterien definiert. Diese müssen eine quantitative Bewertung des Systemverhaltens des SuT im Vergleich zum Referenzfahrer ermöglichen. Beispiele sind eine positive Risikobilanz der Unfallrate bei aggregierten Kriterien oder die Verringerung von Kritikalitätsmetriken bei szenarienbasierten Akzeptanzkriterien, relativ zum im ersten Schritt ausgewählten (vorbildlichen) Referenzfahrer. Die Akzeptanzkriterien werden in aggregiertes oder szenarienbasiertes Verhalten unterteilt und in die GSN eingeordnet.

- **Kontext:** Definition des menschlichen Referenzfahrers
- **Nachweis:** Definition Akzeptanzkriterien und Einordnung aggregierter und szenarienbasierter Kriterien in GSN

#### 5.1.2 Prozessschritt 2: Szenarienbasierte Datenauswahl

Den Kern des szenarienbasierten Testansatzes bildet die Definition und Anwendung einer Szenariendatenbank (vgl. Anforderung 1). Daher erfolgt im Rahmen des entwickelten Prozesses die Auswahl und Gewinnung von Realdaten zur Definition von Akzeptanzkriterien auf Basis der Szenariendefinition und in Einklang mit dem szenarienbasierten Testansatz (Strategie S2).

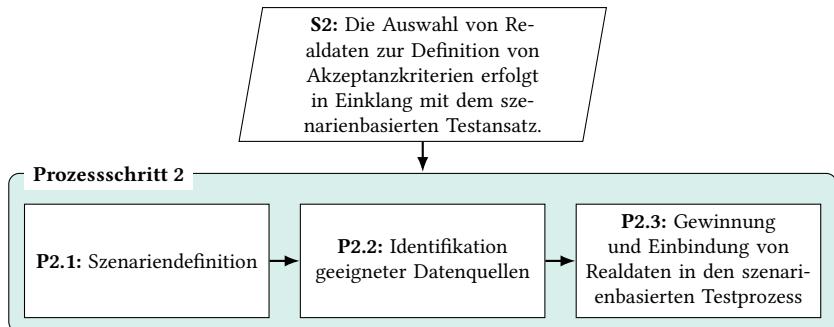


Abbildung 5.3: Prozessschritt 2

Dabei hat die Definition des menschlichen Referenzfahrers in Prozessschritt 1 einen zentralen Einfluss auf die erforderliche Datenauswahl (vgl. Abschnitt 3.3.3.2). Wird z. B. ein durchschnittlicher Fahrer betrachtet, können NDS wie SHRP2 [115], Drohnen [84] oder andere Verkehrsüberwachungsdaten verwendet werden, um das Verhalten und die Leistung von Fahrern im Allgemeinen oder in speziell relevanten ODD-Bedingungen und Szenarien zu charakterisieren.

Für sicherheitskritische Szenarien dienen Unfalldatenbanken wie GIDAS [124] oder CRSS [125] als potenzielle Quelle und ermöglichen auch die Berechnung der statistisch zwischen zwei Unfällen zurückgelegten Strecke anhand einer Schätzung der insgesamt zurückgelegten Fahrzeugkilometer [110]. Damit können gezielt kritische Realdaten gewonnen werden, die unsichere und potenziell unbekannte Szenarien gemäß ISO 21448 beinhalten (vgl. Abb. 2.4). Während dies einen aggregierten Vergleich ermöglicht, bieten Unfalldatenbanken in der Regel nicht genügend Details für die Ableitung eines szenarienbasierten Fahrermodells (vgl. Anforderung 5).

Wenn ein definierter menschlicher Fahrer wie z. B. ein Fahrlehrer oder IFTD als Referenz dient, kann eine gezielte Datensammlung innerhalb der ODD notwendig sein. Ein Vorteil ist die einfachere Sicherstellung kompatibler Sensorik und hoher Datenqualität für den Vergleich mit dem SuT. Die Ergebnisse

für den ausgewählten menschlichen Referenzfahrer können dann mit größeren Datensätzen aus einer NDS [191] verglichen werden.

### P2.1: Szenariendefinition

Die Definition der Szenarien erfolgt anhand der in Abschnitt 3.2.1 eingeführten Abstraktionsebenen. Die Verwendung einer einheitlichen Szenarien- und ODD-Definition sowohl für den Test des SuT als auch für die Sammlung und Analyse von Realdaten für die Definition von Akzeptanzkriterien ermöglicht eine durchgängige Betrachtung zwischen verschiedenen Datenquellen und Testplattformen (vgl. Anforderung 2). Die Definition von SuT und ODD beinhaltet dabei auch den Anwendungsfall des Systems und daraus abgeleitete Fahrtziele, gewählte Routen sowie die möglichen Trajektorien des Systems. Dies kann die Szenariendefinition beeinflussen, z. B. muss bei Nutzfahrzeugen im Gegensatz zu PKW das Rangieren mit Anhängern sowie das Ausschwenken eines Aufliegers berücksichtigt werden.

- **Kontext:** Definitionen menschlicher Referenzfahrer, SuT und ODD
- **Nachweis:** Szenariendefinition

### P2.2: Identifikation geeigneter Datenquellen

Bei der Identifikation von Datenquellen spielen neben der Eignung der Daten zur Charakterisierung des menschlichen Referenzfahrers vor allem die Verfügbarkeit, Qualität und Kosten eine Rolle bei der Gewinnung von Daten (vgl. Abschnitt 3.3.2 und Anforderung 6). Neben Realdaten können grundsätzlich auch synthetische Daten oder Simulatorstudien verwendet werden, wenn diese die Beschreibung des menschlichen Referenzfahrers ermöglichen. Als Grundlage der Auswahl kann die in Tabelle 3.3 erfolgte Bewertung von Datenquellen verwendet werden.

- **Kontext:** Definitionen menschlicher Referenzfahrer, SuT, ODD und Szenarien
- **Nachweis:** Auswahl Datenquelle für menschlichen Referenzfahrer

### P2.3: Gewinnung und Einbindung von Realdaten in den szenarienbasierten Testprozess

Im dritten Teilschritt erfolgt die Gewinnung geeigneter Realdaten aus der ausgewählten Datenquelle, um Szenarien innerhalb der angestrebten ODD eines Systems zu extrahieren (Forschungsfrage 2). Hierzu zählt die Auswertung existierender Datensätze oder die Durchführung neuer Testkampagnen. Die gesammelten Daten des menschlichen Referenzfahrers werden in den szenarienbasierten Testprozess eingebunden (vgl. Anforderung 1), indem mit einer Szenarienidentifikation definierte Szenarien im Datensatz extrahiert werden. Hieraus werden z. B. Parameterverteilungen oder Kritikalitätsmetriken für jedes betrachtete Szenario bestimmt. Zusätzlich werden aus den aufgezeichneten Daten ausführbare Simulationsszenarien für den XIL-Test generiert, wenn die Erprobung des SuT in der Simulation an Stelle des Realtests erfolgen soll.

- **Kontext:** Ausgewählte Datenquelle, Definitionen menschlicher Referenzfahrer, SuT, ODD und Szenarien
- **Nachweis:** Beobachtete und/oder ausführbare Szenarien

### 5.1.3 Prozessschritt 3: Anwendung der Akzeptanzkriterien als Teil der szenarienbasierten Freigabeargumentation

Für die Definition eines Modells zur Anwendung von Akzeptanzkriterien ist ein allgemeingültiges Modell anzustreben, das gleichzeitig auf alle Szenarien anwendbar ist. Da dies ebenso herausfordernd wäre wie die Entwicklung eines ADS selbst, ist eine szenarienbasierte Modellentwicklung und Evaluierung für die in der ODD auftretenden Szenarien ein zielgerichteter und damit praktikabler Ansatz. Dieser Ansatz setzt eine Methode der Szenarienidentifikation aus aufgezeichneten Fahrdaten voraus (vgl. Abschnitt 5.1.2), um gezielt Szenarien als Grundlage für die Modellableitung zu extrahieren [91], [192]. Der Hauptvorteil besteht darin, dass ein detailliertes, vom entsprechenden Szenario abhängiges Verhaltensmodell verwendet sowie direkt im szenarienbasierten Testprozess (vgl. Abschnitt 3.2) und für verschiedene Datenquellen und Testumgebungen (vgl. Abschnitt 3.1) eingesetzt werden kann.

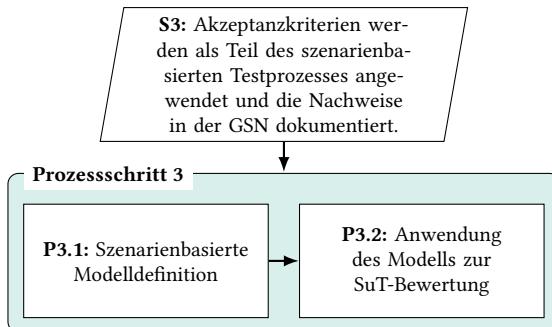


Abbildung 5.4: Prozessschritt 3

### P3.1: Szenarienbasierte Modelldefinition

Die szenarienbasierte Definition stellt sicher, dass der Gültigkeitsbereich der Modelle in Einklang mit der für den SuT-Test eingesetzten Szenariendatenbank festgelegt und in der GSN dokumentiert wird. Beispiele für mögliche Modelle sind NIEON [162], SCM [129] und das FSM aus UN-Regelung Nr. 157 [176] (vgl. Abschnitt 3.3.6).

- **Kontext:** Definitionen von Akzeptanzkriterien und Szenarien, Daten der beobachteten Szenarien
- **Nachweis:** Szenarienbasiertes Modell der Akzeptanzkriterien

### P3.2: Anwendung des Modells zur SuT-Bewertung

Die Anwendung der Referenzmodelle kann grundsätzlich in verschiedenen Testumgebungen erfolgen (vgl. Abschnitt 3.1). Simulationsbasierte Methoden bieten eine effektive Kombination der Vorteile des szenarienbasierten Testens und von XiL-Umgebungen und ermöglichen eine skalierbare Testdurchführung [213]. Werden alternativ SuT-Daten im Realtest oder auf dem Prüfgelände erhoben, ist in Prozessschritt 2 die Vorverarbeitung der Daten zur Identifizierung der relevanten Szenarien notwendig. Abschließend wird die Auswertung der Akzeptanzkriterien für das SuT im GSN dokumentiert und als nachverfolgbarer Nachweis in die Freigabeargumentation eingebunden.

- **Kontext:** SuT, Testumgebung, Szenarienbasiertes Modell der Akzeptanzkriterien
- **Nachweis:** Auswertung Akzeptanzkriterien für SuT, Dokumentation im GSN

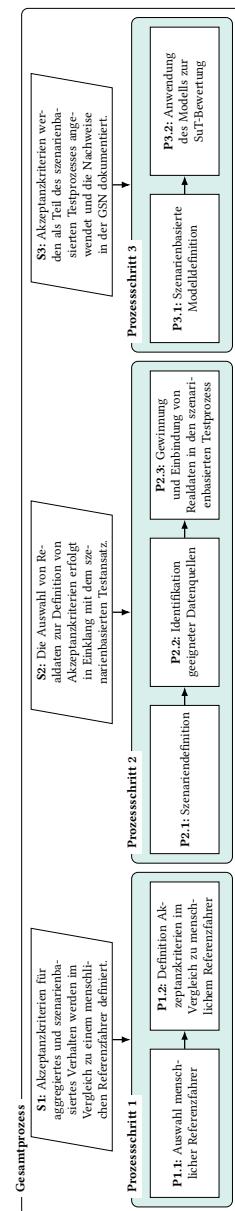
### 5.1.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt Abb. 5.5 alle Teilschritte des Prozesses inklusive der eingesetzten Strategien zur Ableitung der Prozessschritte.

## 5.2 Erweiterung der VVM-Sicherheitsargumentation

Die Zielsetzung des vorgeschlagenen Prozesses ist ein Beitrag zur Freigabeargumentation hochautomatisierter Fahrzeuge. Zur Freigabeargumentation zählt die Gesamtheit der Methoden, die im Rahmen der Zulassung hochautomatisierter Fahrzeuge dem Nachweis einer sicheren Produkteinführung dienen. Hierzu gehören die Verifikation und Validierung nach Standards wie ISO 26262, die Entwicklung nach Automotive SPICE (vgl. Abschnitt 2.3) sowie der Nachweis der SOTIF nach ISO 21448 (vgl. Abschnitt 2.3.4). Eine Möglichkeit zur strukturierten Darstellung des Nachweises der Abwesenheit von unangemessenem Risiko nach ISO 21448 wurde im VVM-Projekt als GSN formuliert (vgl. Abb. 3.14).

Als alternatives Vorgehen kann eine eigene Argumentation als GSN aufgebaut und auf einen speziellen Anwendungsfall zugeschnitten werden. Im Rahmen der Dissertation ist hingegen das Ziel, die Erweiterung und Konkretisierung der Rolle von Akzeptanzkriterien in der im VVM-Projekt definierten Sicherheitsargumentation. Nachfolgend wird die in Anforderung 3 geforderte Einordnung des in Abschnitt 5.1 entwickelten Prozesses in die VVM-GSN beschrieben.



**Abbildung 5.5:** Übersicht des Gesamtprozesses zur strukturierten Freigabeargumentation

Abb. 5.6 zeigt die Erweiterung der VVM-Sicherheitsargumentation (grau hinterlegter Kasten, vgl. Abb. 3.14) um die in Abschnitt 5.1 definierten Strategien und Prozessschritte unterhalb von Ziel G10 zum Vergleich von geschätzten Restrisiken des SuT mit den definierten Akzeptanzkriterien. Die gewählte Strukturierung der Prozessschritte erlaubt die direkte Zuordnung der definierten Strategien S1 bis S3 zu den Zielen G13 bis G15 (vgl. Abschnitt 3.3.5). Für die neu hinzugefügten Strategien wird die Nummerierung von Strategie S1 bis S3 aus Abb. 5.1 für eine bessere Übersicht innerhalb der Dissertation beibehalten. Keine der Strategien S1, S2 und S3 ist in [149] bereits belegt, da dort eine aufsteigende Nummerierung über alle GSN-Elemente inklusive Zielen, Kontexten und Nachweisen verwendet wird.

Zuerst wird Strategie S1 dem Ziel G13 zugeordnet. Diese umfasst die notwendige Kombination von aggregierten und szenarienbasierten Akzeptanzkriterien, um einen vollständigen Nachweis der Abwesenheit von unangemessenem Risiko zu führen (vgl. Abschnitt 5.1.1). Aufgrund der Bedeutung des Vergleichs zum menschlichen Fahrer für die gesellschaftliche Akzeptanz von ADS (vgl. Abschnitt 3.3.6), werden die Akzeptanzkriterien im Vergleich zu einem menschlichen Referenzfahrer definiert.

Als zweiter Prozessschritt wird Strategie S2 dem Ziel G14 zugeordnet, mit dem die valide Nutzung der Akzeptanzkriterien gezeigt wird. Die Entwicklung und Absicherung von hochautomatisierten Fahrzeugen erfolgt anhand des szenarienbasierten Testprozesses (vgl. Abschnitt 3.2). Daher müssen auch Akzeptanzkriterien basierend auf dem szenarienbasierten Ansatz definiert werden, um eine nachverfolgbare Zuordnung zu gewährleisten. Ein weiterer Aspekt ist die Gewinnung von Realdaten menschlicher Fahrer, die für die Definition von Akzeptanzkriterien eingesetzt werden. Um die Vergleichbarkeit zwischen Daten menschlicher Fahrer und des SuT sicherzustellen, wird eine einheitliche Definition und Anwendung von ODD sowie Szenarien gefordert.

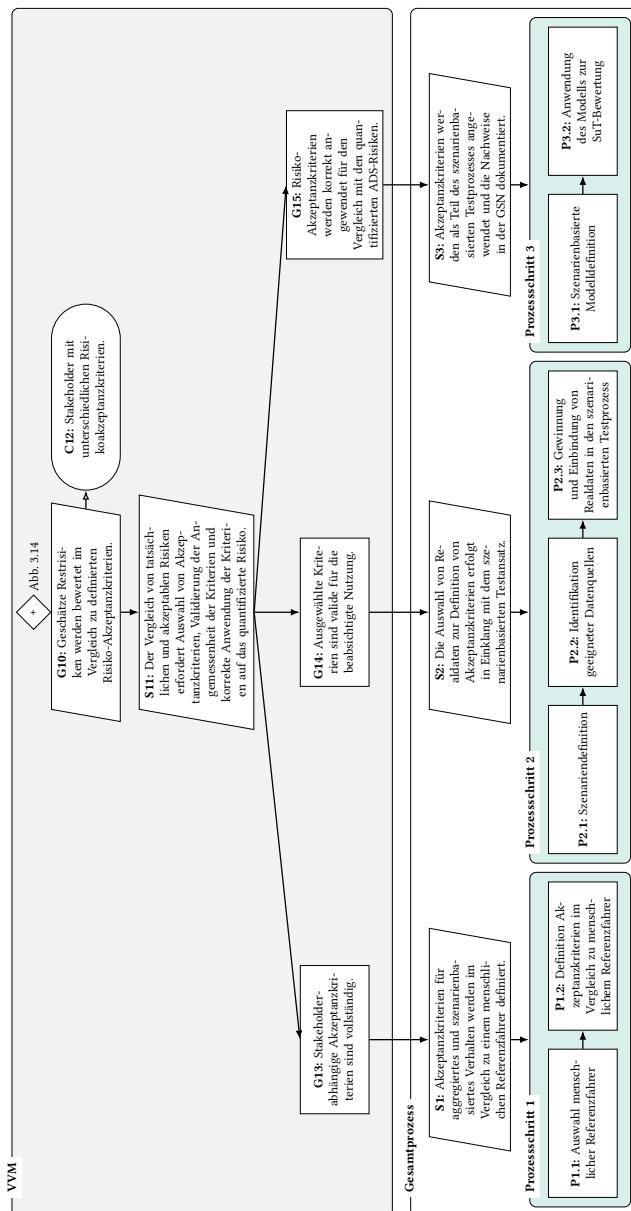


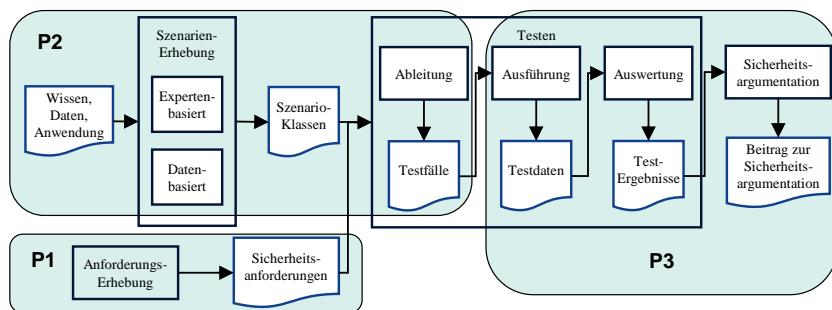
Abbildung 5.6: Erweiterung der VVM-Sicherheitsargumentation (vgl. Abb. 3.14)

Im dritten Schritt wird Strategie S3 dem Ziel G15 der korrekten Anwendung der Akzeptanzkriterien zugeordnet. Zur Anwendung der Akzeptanzkriterien wird erneut der szenarienbasierte Testprozess als Grundlage verwendet, um die Risiken des SuT zu ermitteln und mit den für die einzelnen Szenarien entwickelten Akzeptanzkriterien zu vergleichen. Zusammenfassend müssen die notwendigen Nachweise für jeden Prozessschritt innerhalb der GSN als strukturierter Freigabeargumentation dokumentiert werden.

## 5.3 Einordnung in den szenarienbasierten Testprozess

Der szenarienbasierte Testprozess stellt den Stand der Technik für Test und Freigabe automatisierter Fahrzeuge dar (vgl. Abschnitt 3.2). Daher wird die notwendige Konformität des vorgeschlagenen Prozesses mit dem szenarienbasierten Testprozess in Anforderung 1 definiert.

Der in Abschnitt 5.1 entwickelte Prozess wird dafür in das zuvor eingeführte Framework des szenarienbasierten Testprozesses eingeordnet (vgl. Abb. 3.9). Hierzu sind die drei Prozessschritte in Abb. 5.7 eingezeichnet und werden nachfolgend diskutiert.



**Abbildung 5.7:** Einordnung in Framework für szenarienbasiertes Testen basierend auf [82] und [214]

Prozessschritt 1 (vgl. Abschnitt 5.1.1) entspricht der Definition von Sicherheitsanforderungen im szenarienbasierten Testprozess, die durch die Verwendung eines menschlichen Fahrers als Referenz für den Nachweis der Abwesenheit von unangemessenem Risiko umgesetzt wird. Hierfür werden messbare Akzeptanzkriterien definiert, die als Grundlage der Bewertung des SuT in die nächsten Testschritte einfließen.

Prozessschritt 2 (vgl. Abschnitt 5.1.2) umfasst zuerst die Definition der Szenarien, die für den Anwendungsfall relevant sind. Anschließend folgt die Auswahl geeigneter Datenquellen (vgl. Abschnitt 3.3.3.2), wobei sowohl Experten- als auch datenbasierte Methoden kombiniert werden können. Gesammelte Daten werden in den Testprozess eingebunden, indem ausführbare Szenarien generiert werden. Zusammen mit den Akzeptanzkriterien aus Prozessschritt 1 resultieren Testfälle, indem das Akzeptanzkriterium für die Bewertung des SuT eingesetzt wird.

Prozessschritt 3 (vgl. Abschnitt 5.1.3) umfasst die Anwendung der Akzeptanzkriterien, indem die ausführbaren Szenarien in einer geeigneten Testumgebung ausgeführt und das Systemverhalten des SuT mit den Akzeptanzkriterien im Vergleich zum menschlichen Fahrer bewertet werden. Mit der Verwendung eines vorbildlichen Fahrers als Akzeptanzkriterium ergibt sich die Verbindung zur Sicherheitsargumentation als letztem Schritt des Frameworks (vgl. Abb. 5.7). Damit wird der Bogen geschlagen zur Motivation des Prozesses aus der Vermeidung von unangemessenem Risiko und der zugehörigen Minimierung von unsicheren Szenarien nach ISO 21448 (vgl. Abb. 2.4).

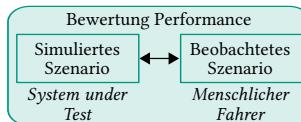
Nachfolgend werden zusätzlich die im Prozess verwendeten Abstraktionsebenen und Arten von Szenarien (vgl. Abschnitt 3.2.1 und Abschnitt 3.3.1.3) sowie Metriken zur Bewertung der Szenarien (vgl. Abschnitt 3.2.3) betrachtet.

### 5.3.1 Abstraktionsebenen von Szenarien

Basierend auf der Klassifikation von Szenarien nach Braun et al. (vgl. Abschnitt 3.3.1.3) ergeben sich in Prozessschritt 2 bei der Verwendung von NDD

basierend auf menschlichen Fahrern beobachtete Szenarien. Mit der Generierung und Ausführung der Szenarien in XiL-Umgebungen entstehen simulierte Szenarien unter Verwendung des SuT.

Bei beiden Szenarien handelt es sich um konkrete Szenarien nach der Klassifikation des Abstraktionsgrads (vgl. Abschnitt 3.2.1). Damit wird der direkte Vergleich ermöglicht, wobei entweder der menschliche Fahrer oder das SuT die Fahraufgabe ausführt. Beide Szenarien dienen als Grundlage zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 in Prozessschritt 3 (vgl. Abschnitt 5.1.2). Dazu wird die Performance des SuT im simulierten Szenario mit dem menschlichen Fahrer im beobachteten Szenario verglichen (vgl. Abb. 5.8).



**Abbildung 5.8:** Vergleich von simulierten und beobachteten Szenarien

### 5.3.2 Bewertung von Szenarien

Die Bewertung der Performance als Grundlage für Akzeptanzkriterien erfolgt basierend auf verschiedenen Metriken. Als Bedingung für die Anwendbarkeit der Metriken im Rahmen des Prozesses gilt, dass diese sowohl für beobachtete als auch simulierte Szenarien berechenbar sein müssen. Verschiedene Möglichkeiten zur Bewertung von Szenarien sowie die Definition von Kritikalität zur Beschreibung von sicherheitsrelevanten Szenarien wurden in Abschnitt 3.2.3 eingeführt. Da Kritikalitätsmetriken basierend auf kinematischen Größen berechnet werden, sind sie für beide Arten von Szenarien anwendbar und erfüllen die genannte Bedingung. Die notwendigen Informationen werden in Form von Objektlisten gewonnen, die Positionen, Dimensionen und Geschwindigkeiten der statischen und dynamischen Objekte über den zeitlichen Verlauf eines Szenarios enthalten.

Die Bedingung schließt hingegen Metriken aus, die interne Systemgrößen der Fahrzeugsoftware verwenden, da diese für das beobachtete Szenario mit

menschlichem Fahrer nicht existieren. Beispiele für systemspezifische Metriken sind Warn- und Eingriffsschwellen von Fahrerassistenzsystemen, ab denen der Fahrer zuerst auf eine mögliche Kollision hingewiesen wird, bevor selbstständig eine Notbremsung erfolgt. Beide Schwellen für ein Notbrems- und Abbiegeassistenzsystem wurden in [216] für den Vergleich von auf dem Prüfgelände und in der SiL-Simulation durchgeföhrten Szenarien eingesetzt. Für den hier betrachteten Vergleich sind diese Metriken hingegen nicht anwendbar, da ein unterschiedliches SuT für das beobachtete und simulierte Szenario vorliegt.

## 5.4 Einordnung in Freigabeargumentation

Die Einordnung des Prozesses in die Freigabeargumentation sowie die Unterscheidung zwischen aggregierten Maßen und szenarienbasierten Referenzmodellen zur Beschreibung von Akzeptanzkriterien werden nachfolgend diskutiert. In Anforderung 4 wird die Definition von Akzeptanzkriterien basierend auf dem menschlichen Fahrer gefordert (vgl. Forschungsfrage 1). Damit dienen die Akzeptanzkriterien dem Nachweis der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos gemäß ISO 21448 im Vergleich zum betrachteten menschlichen Referenzfahrer (vgl. Abschnitt 5.1.1).

### 5.4.1 Vergleich mit Zielen der ISO 21448

Ausgehend von den vier Bereichen der Risiko-Matrix in Abb. 2.4 ist das Ziel der SOTIF-Aktivitäten die Reduzierung von möglichem unsicheren Verhalten in den Bereichen der unsicheren bekannten und unbekannten Szenarien innerhalb der Matrix. Hierfür ist eine Argumentation notwendig, dass das Restrisiko aufgrund dieser Szenarien hinreichend gering ist und die Akzeptanzkriterien erfüllt.

Dieses Ziel wird basierend auf dem Konzept der Risiko-Matrix in ISO 21448 [45] in drei Schritte unterteilt:

1. Bewertung der Akzeptanz des Risikos von bekannten unsicheren Szenarien (Bereich 2) basierend auf der Analyse der beabsichtigten Funktion.
2. Reduktion der Wahrscheinlichkeit von bekannten unsicheren Szenarien (Bereich 2), die unsicheres Verhalten in verursachen, auf ein gesellschaftlich akzeptables Maß durch funktionelle Veränderungen.
3. Reduktion der Wahrscheinlichkeit von unbekannten Szenarien, die unbekannte unsichere Szenarien (Bereich 3) verursachen können, auf ein Akzeptanzkriterium durch die Verifikations- und Validierungsstrategie (vgl. Abschnitt 2.3.4).

#### 5.4.2 Bekannte unsichere Szenarien

Die ersten beiden Ziele erfordern die Definition von Akzeptanzkriterien, mit denen die Abwesenheit von unangemessenem Risiko für ein hochautomatisiertes Fahrzeug nachgewiesen werden kann. Diese Kriterien werden in Anforderung 3 als gesellschaftlich akzeptierte Akzeptanzkriterien bezeichnet.

Im entwickelten Prozess werden dabei zwei grundsätzliche Arten von Akzeptanzkriterien berücksichtigt, die das aggregierte und das szenarienbasierte Systemverhalten des SuT bewerten.

##### Aggregierte Akzeptanzkriterien

Forschungsarbeiten zur aggregierten Risikobewertung, die ein Gesamtrisiko für definierte logische Szenarien mit zugehörigen Parameterverteilungen statistisch mit XiL-Tests abschätzen, finden sich bereits in [103] und [10] (vgl. Abschnitt 3.3.1.4). Außerdem haben diese in ISO 34502 [86] Einzug gefunden als Möglichkeit für die Definition von Sicherheitsanforderungen im szenarienbasierten Testprozess. Der Einsatz der aggregierten Akzeptanzkriterien zum Nachweis einer positiven Risikobilanz wurde bereits in [110] für ein beispielhaftes System nach SAE-Level 3 gezeigt. Kriterien basierend auf der Unfallrate als aggregiertem Akzeptanzkriterium können direkt in den entwickelten Prozess integriert werden, stehen jedoch nicht im Fokus dieser Dissertation.

## Szenarienbasierte Akzeptanzkriterien

Während eine positive Risikobilanz als aggregiertes Maß für das Restrisiko ein essentielles Akzeptanzkriterium für die Freigabe hochautomatisierter Fahrzeuge bildet, ist dieses nicht ausreichend zur Argumentation der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos (vgl. Abschnitt 3.3.6.5). In ISO 21448 wird als mögliches zusätzliches Akzeptanzkriterium die *Leistungsfähigkeit eines sich vorbildlich verhaltenden Fahrers* genannt, jedoch keine konkreten Vorgaben für die Definition dieses Akzeptanzkriteriums gegeben (vgl. Abschnitt 6.5 in [45]).

Ein relevantes Beispiel für eine szenarienbasierte Bewertung basierend auf einem solchen Akzeptanzkriterium liefert die 2020 veröffentlichte UN-Regelung Nr. 157 für ALKS (vgl. Abschnitt 4.1). Das definierte Wirkungsmodell eines „geübten und aufmerksamen menschlichen“ Fahrers wurde basierend auf der menschlichen Leistungsfähigkeit definiert. Das Modell dient als Orientierung für die Unterscheidung zwischen vermeidbaren und unvermeidbaren Kollisionen, wobei erwartet wird, dass einige der unvermeidbaren Kollisionen vom SuT vermieden werden können. Basierend auf dieser Regelung wurde 2021 in Deutschland das erste System mit SAE-Level 3 [20] zertifiziert (vgl. Abschnitt 2.2).

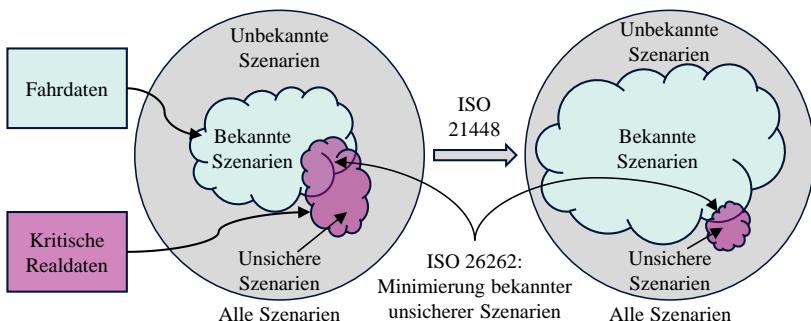
Für Systeme nach SAE-Level 4 existieren hingegen keine konkreten Vorschriften für Akzeptanzkriterien im Vergleich zum menschlichen Fahrer. Bestehende Modelle wie das FSM aus UN-Regelung Nr. 157 decken außerdem nur einen limitierten Szenarienkatalog mit einer vereinfachten Szenariendefinition ab und sind daher nicht ohne Erweiterung für SAE-Level 4 Systeme übertragbar [193]. Zusätzlich wurden Modelle wie das FSM trotz der Verwendung in der UN-Regelung bisher nicht mit realen Unfalldaten validiert [194]. Damit besteht Forschungsbedarf für die Weiterentwicklung von szenarienbasierten Referenzmodellen als Akzeptanzkriterium.

Im letzten Schritt des Prozesses wird mit der Überprüfung der Akzeptanzkriterien gezeigt, ob die durchgeführten Testfälle einen Nachweis zur Unterstützung einer Freigabeempfehlung liefern, oder ob weitere funktionale Modifikationen des Systems zur Erfüllung der Akzeptanzkriterien notwendig sind (vgl. Ziel 2).

### 5.4.3 Unbekannte unsichere Szenarien

Das dritte Ziel zur Reduktion unbekannter unsicherer Szenarien wird im Rahmen von Prozessschritt 2 durch die Einbindung kritischer Realdaten adressiert (vgl. Abschnitt 5.1.2). Aufgrund der geringeren Auftretenswahrscheinlichkeit von unsicheren und unbekannten Szenarien (vgl. Abschnitt 3.3.2.2), decken z. B. im FOT gesammelte Fahrdaten vor allem bekannte und sichere Szenarien ab (vgl. Abb. 5.9). Eine Untersuchung der Eignung verschiedener Datenquellen wurde in Abschnitt 3.3.3.2 durchgeführt, wobei Aufnahmen aus kommerziellen Flottenüberwachungssystemen als vielversprechende Datenquelle identifiziert wurden.

Die im Prozess verwendeten kritischen Realdaten zielen hingegen explizit auf die Abdeckung der unsicheren und potenziell unbekannten Szenarien ab. Dies trägt zur in ISO 21448 geforderten Reduzierung von unbekannten Szenarien (vgl. Ziel 3) und der Validierung des Szenarienkatalogs anhand von Realdaten bei (vgl. Abb. 5.9).



**Abbildung 5.9:** Darstellung der ODD-Abdeckung basierend auf [195]

#### 5.4.4 Zusammenfassung

Der Fokus dieser Dissertation ist die Betrachtung von kritischen Szenarien, die den Test und die Bewertung des SuT in sicherheitsrelevanten Szenarien ermöglichen. Die Definition und Überprüfung von Akzeptanzkriterien als Teil eines einheitlichen szenarienbasierten Testprozesses ist die entscheidende Zielsetzung im Rahmen der Freigabeargumentation hochautomatisierter Fahrzeuge. Dies unterstreicht der Fokus aktueller europäischer Forschungsprojekte wie SUNRISE [144], V4SAFETY [145] und SYNERGIES [146] zur Vereinheitlichung und Weiterentwicklung der Sicherheitsargumentation im Rahmen des Open World Kontext.

Im vorgeschlagenen Prozess (vgl. Abschnitt 5.1) werden hierzu sowohl aggregierte als auch szenarienbasierte Maße für die Definition und Überprüfung von Akzeptanzkriterien in kritischen Szenarien berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.3.6). Trotzdem ist dies nicht das einzige Ziel im Rahmen der Freigabeargumentation, da ebenso Aspekte wie gesellschaftlich akzeptables, kooperatives und rücksichtsvolles Fahrverhalten relevant sind. Während das Hauptaugenmerk der Dissertation auf der Bewertung kritischer Szenarien und der Erfüllung der Akzeptanzkriterien im Rahmen der Sicherheitsargumentation liegt, wird die Erweiterung des Prozesses um zusätzliche Bewertungsziele basierend auf gesellschaftlicher Akzeptanz in Abschnitt 3.3.6.3 diskutiert. Damit wird auch der Vergleich mit Akzeptanzkriterien für Szenarien berücksichtigt, in denen das SuT-Verhalten zwar kein Risiko darstellt, jedoch unbeabsichtigtes Verhalten im Konflikt mit anderen Systemanforderungen steht.

Aus Sicht der Kunden von Nutzfahrzeugen zählen außerdem wirtschaftliche Aspekte wie die erreichbare Lenkzeit pro Tag, die Zuverlässigkeit und Wartung der Systeme sowie der Kraftstoffverbrauch für die Erfüllung der Erwartungen. Diese sind Teil des spezifizierten Betriebskonzepts und werden als Teil des anforderungsbasierten Testens verifiziert sowie durch die Erprobung im FOT validiert. Damit bilden diese Anforderungen ebenfalls einen Beitrag zur Freigabeargumentation, der jedoch nicht im Fokus der Dissertation steht. Grundsätzlich können auch diese Kriterien mit dem entwickelten

Prozess strukturiert werden, wenn die notwendigen Akzeptanzkriterien im Vergleich zu einem menschlichen Referenzfahrer formuliert werden können.

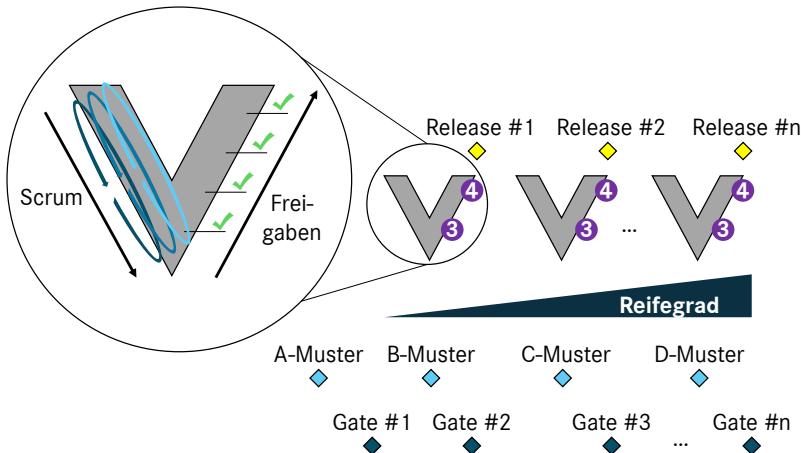
## 5.5 Einordnung in exemplarischen Entwicklungsprozess

Neben der Einordnung in die Freigabeargumentation ist die Einbindung in den in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen exemplarischen Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie für die praktische Anwendbarkeit des Prozesses entscheidend. Dabei ist die genaue Platzierung des Prozesses innerhalb von Abb. 2.3 abhängig vom betrachteten SuT und den für dessen Test geeigneten Testumgebungen.

Für den funktionalen Test der Verhaltens- und Planungsssoftware eines hochautomatisierten Nutzfahrzeugs mit SAE-Level 4 bieten SiL-Umgebungen den Vorteil einer hohen Skalierbarkeit. Notwendig ist eine für den Softwaretest hinreichende Modellierungstiefe der Umgebungs- und Fahrdynamikmodelle, mit denen eine valide Testumgebung gegenüber dem Realtest ermöglicht wird (vgl. Abschnitt 3.1.3).

In [213] wird gezeigt, dass dieser Anwendungsfall ein großes Potenzial bietet, die Vorteile von szenarienbasierten Tests und XiL-Umgebungen zu kombinieren. Im Automotive SPICE Modell [26] entspricht dies dem Prozessschritt Softwareintegration und Integrationstests (vgl. Schritt 3 in Abb. 5.10). Wird als SuT hingegen der vollständige Software-Stack eines automatisierten Fahrzeugs im Zuge eines Realtests auf der Zielhardware betrachtet, lässt sich dies dem Prozessschritt Systemqualifizierungstest des Automotive SPICE Modells zuordnen (vgl. Schritt 4 in Abb. 5.10).

Unabhängig von SuT und Testumgebung ist der Prozess der rechten Seite des V-Modells zugehörig. Während das Ziel des Prozesses die Produktfreigabe im finalen Durchlauf des V-Modells ist, kann der Prozess analog zu den Freigabe-Stages in Abb. 2.3 mehrfach durchlaufen werden.



**Abbildung 5.10:** Einordnung in exemplarischen Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie [213]

Dabei trägt die iterative Erweiterung der Szenariendatenbank sowie die Weiterentwicklung der verwendeten Bewertungsmethoden und Freigabekriterien zur kontinuierlichen Validierung des Systems bei. Außerdem kann bereits während der Entwicklungsphase ein Mehrwert durch die Bewertung des Systemverhaltens des SuT in den gesammelten kritischen Szenarien im Vergleich zu den definierten Akzeptanzkriterien generiert werden.

## 5.6 Einschränkungen

In Randbedingung 2 in Abschnitt 4.2.2 wird die Bedeutung der Validität der verwendeten Simulationsumgebungen für deren Beitrag zur Freigabeargumentation herausgestellt. Da die Validierung der verwendeten Testumgebungen selbst kein Ziel dieser Dissertation ist, werden die folgenden Vereinfachungen getroffen.

### E1: Vereinfachte Abbildung der Sensorik und Umfelderfassung

Die funktionalen Schichten Informationsaufnahme und -verarbeitung der Ebene „Sense“ sind kein Teil des in dieser Dissertation betrachteten SuT. Die Objekterkennung und -verfolgung wird durch Modelle ersetzt, wodurch Fehler in der Umfeldwahrnehmung unter Umständen nicht ausreichend abgebildet werden. Die Simulation und Validierung der Umfelderfassung sind Teil aktueller Forschung (vgl. z. B. [196], [197], [198]) und werden hier nicht explizit betrachtet. Die Übertragbarkeit des Prozesses auf ein SuT unter Einbeziehung der Sensorik und Umfelderfassung wird angestrebt, muss aber separat nachgewiesen werden. Zu berücksichtigende Aspekte sind die erhöhten Anforderungen an die Qualität der aufgezeichneten Realdaten zur Abbildung von Sensoreffekten, die Erweiterung der Umgebungssimulation um die Erzeugung von Sensorrohdaten sowie die mögliche Ergänzung der Vergleichs- und Performancebewertung um zusätzliche Kriterien.

### **E2: Vereinfachte Abbildung des Fahrzeugs**

Für die Betrachtung in einer XiL-Umgebung wird die Abbildung des Ego-Fahrzeugs über ein Fahrzeugmodell benötigt. Basierend auf der geplanten Trajektorie als Ausgabe der Ebene „Plan“ werden Befehle für die Fahrzeugaktorik in der funktionalen Schicht „Act“ berechnet. Durch die vereinfachte Abbildung des Fahrzeugs durch ein Fahrzeugmodell kann es zu Fehlern zwischen der Fahrzeugreaktion in der Simulation gegenüber dem realen Verhalten des Fahrzeugs kommen. Die Validierung des Fahrzeugmodells ist kein Ziel dieser Dissertation, weshalb ein validiertes Fahrzeugmodell vorausgesetzt wird. Eine Übersicht über Methoden für die Validierung von Fahrzeugmodellen findet sich bspw. in [190].

### **E3: Vereinfachte Abbildung der Hardware im SiL-Test**

Bei der Verwendung von SiL-Umgebungen wird die Simulation nicht auf der Zielhardware der Steuergeräte durchgeführt, auf denen die Verhaltens- und Planungssoftware des hochautomatisierten Fahrzeugs im realen Fahrzeug betrieben wird. Damit können Latenzen und Effekte von nichtdeterministischen Algorithmen nicht exakt abgebildet werden. Für eine nähere Betrachtung der verschiedenen XiL-Testumgebungen und deren Einbindung in den Testprozess wird auf [30] verwiesen.

## 5.7 Zusammenfassung

Vorgestellt wird ein neuer Prozess zur Einbindung von Realdaten in die Sicherheitsargumentation (vgl. Abschnitt 5.1), der speziell auf den Vergleich des SuT mit Akzeptanzkriterien basierend auf der Leistungsfähigkeit des menschlichen Fahrers abzielt. Dies entspricht der Definition von Akzeptanzkriterien zur Abwesenheit eines unangemessenen Risikos nach ISO 21448 und liefert einen direkten Beitrag zur Freigabeargumentation.

Die Bewertung des SuT in definierten Szenarien wird ermöglicht, indem aus NDD ausführbare Szenarien extrahiert und in XiL-Umgebungen für den simulativen Test des SuT verwendet werden. Damit trägt der Prozess direkt zur in ISO 21448 geforderten Reduzierung von unbekannten unsicheren Szenarien bei. Für den strukturierten Nachweis im Rahmen einer Freigabeargumentation wird eine GSN verwendet, und die im VVM-Projekt entwickelte Sicherheitsargumentation um die definierten Prozessschritte erweitert.

## **6 Anwendung auf aggregierte Akzeptanzkriterien für die Freigabe hochautomatisierter Nutzfahrzeuge<sup>1</sup>**

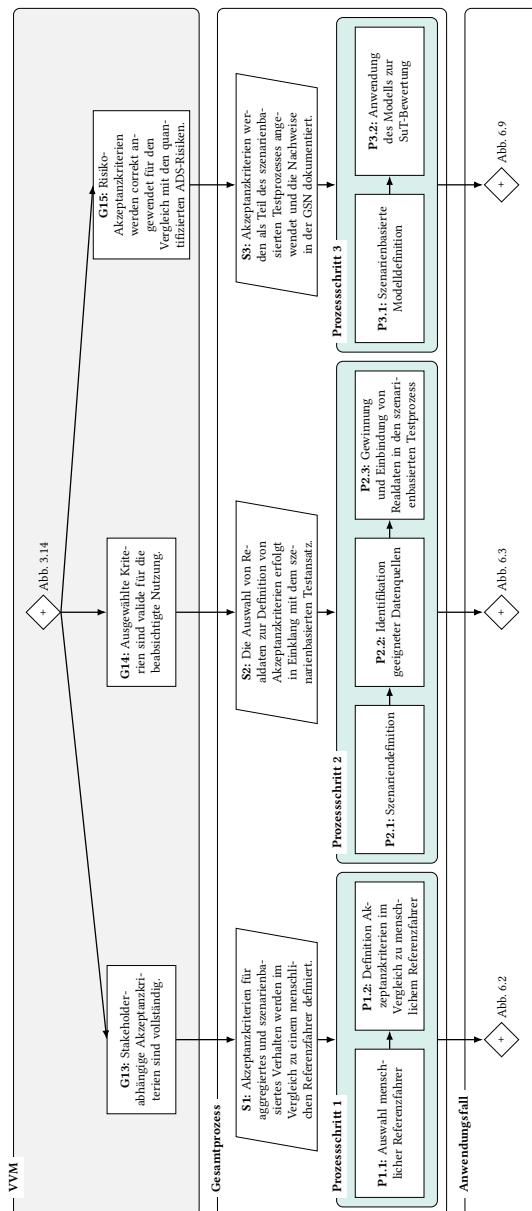
Im ersten Anwendungsfall werden Akzeptanzkriterien für das aggregierte Verhalten von hochautomatisierten Nutzfahrzeugen betrachtet. Als SuT wird die Verhaltens- und Planungssoftware von hochautomatisierten LKW nach SAE-Level 4 [5] und der Klasse 8 (zulässiges Gesamtgewicht >33.001 lbs) untersucht, die für den Warentransport zwischen Logistikzentren eingesetzt werden. Speziell wird auf gesellschaftliche Erwartungen an das Systemverhalten des SuT eingegangen, die soziales, vorhersehbares und verantwortungsvolles Verhalten (engl. "Roadmanship") [50] von automatisierten Fahrzeugen gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern fordern.

Im Rahmen dieses Anwendungsfalls wird der in Kapitel 5 definierte Prozess angewendet, um ein kompetentes Fahrermodell als Akzeptanzkriterium für das aggregierte Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge zu definieren. Als strukturierter Beitrag zur Freigabeargumentation ergibt sich als Ergebnis des vorgeschlagenen Prozesses die GSN in Abb. 6.1.

Dem Ansatz des Safety II Konzepts folgend, liegt der Fokus auf alltäglichen Fahrsituationen. Die zuvor beschriebene Methode von Tejada et al. [165] (vgl. Abschnitt 3.3.6) wird um den Ansatz erweitert, ein kontinuierliches Fahrermodell basierend auf Fahrdaten von ausgewählten menschlichen Fahrern zu parametrisieren.

---

<sup>1</sup> Teile dieses Abschnitts wurden bereits in ähnlicher Form vom Autor in [217] publiziert



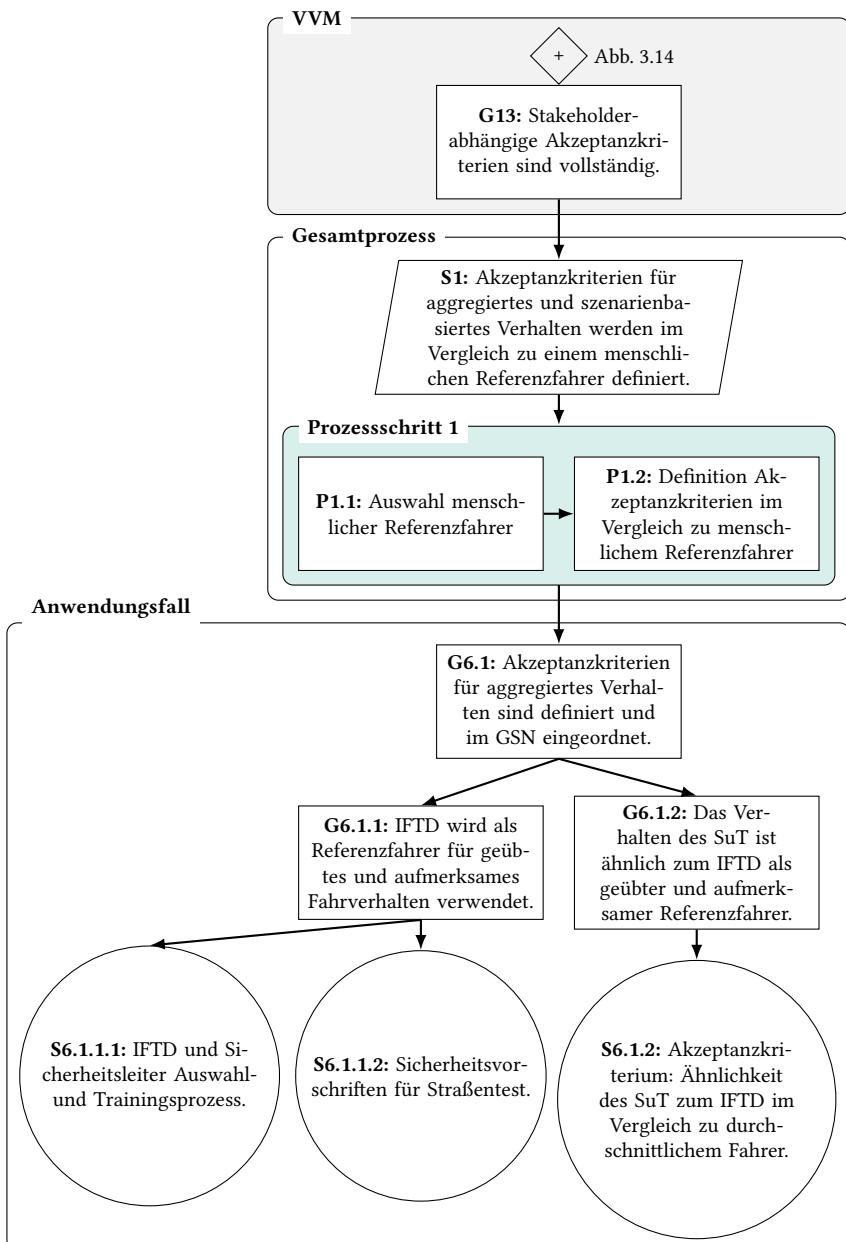
**Abbildung 6.1:** GSN der VVM-Sicherheitsargumentation (vgl. Abb. 3.14) erweitert um Gesamtprozess (vgl. Abb. 5.6) und Ergebnisse des Anwendungsfalls eines kompetenten Fahrermodells als Akzeptanzkriterium  
140

Aufbauend auf der VVM-Sicherheitsargumentation [149] und den ergänzten Schritten aus Kapitel 5 wird ein kompetentes Fahrermodell basierend auf menschlichen Sicherheitsfahrern als Akzeptanzkriterium definiert (Prozessschritt 1). Dabei werden speziell geschulte Sicherheitsfahrer (IFTD) eingesetzt, die als mögliche Referenz für ein kompetentes Fahrermodell vorgeschlagen werden. Anschließend werden geeignete Szenariendaten ausgewählt (Prozessschritt 2) sowie das Modell für das SuT angewendet (Prozessschritt 3). Die entwickelten Unterziele und Nachweise sind in der GSN als Verweis auf die jeweiligen Prozessschritte eingezzeichnet und werden nachfolgend detailliert beschrieben.

## **6.1 Definition und Einordnung Akzeptanzkriterium für aggregiertes Verhalten**

In Anbetracht des Interesses an der Einbeziehung des menschlichen Fahrers in die Freigabeargumentation von hochautomatisierten Fahrzeugen stellt sich zuerst die Frage, wie eine menschliche Referenz für kompetentes Fahrverhalten definiert werden kann. Ziel ist die Ableitung eines Fahrermodells, das in die Freigabeargumentation eingebunden werden kann.

Abb. 6.2 zeigt den aus Prozessschritt 1 (vgl. Abschnitt 5.1.1) resultierenden Teil der GSN in Abb. 6.1, der in den folgenden Abschnitten diskutiert wird. Aus dem Prozess abgeleitete und im GSN neu hinzugefügte Ziele und Nachweise werden den Prozessschritten entsprechend nummeriert. In Kapitel 6 wird für die Nummerierung der Ziele und Nachweise „G6.X“ und „S6.X“ verwendet, wodurch eine direkte Zuordnung zwischen GSN-Elementen und Textabschnitten hergestellt wird (z. B. wird Ziel G5.1.1 in Abschnitt 6.1.1 beschrieben).



### 6.1.1 Auswahl eines menschlichen Referenzfahrers

Wie in Abschnitt 3.3.6 eingeführt, ist die UN-Regelung Nr. 157 für ALKS [177] die erste Norm, die ein Referenzmodell für einen „geübten und aufmerksamen“ menschlichen Fahrer enthält. Im industriellen Entwicklungsprozess spielen menschliche Fahrer hingegen eine etablierte Rolle als Test- oder Sicherheitsfahrer, um eine sichere öffentliche Straßenerprobung zu gewährleisten. Nach SAE J3018 [199] wird ein Sicherheitsfahrer (engl. „fallback test driver“) definiert als:

**Definition Sicherheitsfahrer:** *Eine Person, die speziell für die Überwachung der Leistung von ADS-gesteuerten Fahrzeugprototypen im Straßenverkehr zu Testzwecken ausgebildet und qualifiziert ist.*

Außerdem wird zwischen im Fahrzeug befindlichen und per Fernzugriff auf das Fahrzeug zugreifenden Sicherheitsfahrern unterschieden, je nachdem, ob der Fahrer physisch im Fahrzeug anwesend ist oder von einem entfernten Standort aus drahtlos mit dem Fahrzeug interagiert. Während SAE-Level 4 Systeme die DDT-Rückfallfunktion ausführen müssen, um einen risikominimalen Zustand zu erreichen, überwacht der Sicherheitsfahrer bei einem ADS-Prototyp während der Entwicklung kontinuierlich die Leistung des Systems und setzt das ADS außer Kraft, wenn dies zur Vermeidung einer Gefährdung erforderlich ist [5]. Wie das AVSC [112] erwähnt, „wird ein IFTD zu einem konventionellen (Test-)Fahrer“, wenn er die vollständige DDT ausführt.

Nachfolgend wird der Begriff IFTD auch für Daten verwendet, die mit einem Fahrer gesammelt wurden, der die vollständige DDT übernimmt. Damit wird betont, dass sich der IFTD durch die spezielle Auswahl und Ausbildung von der Verteilung der durchschnittlichen Fahrerleistung unterscheidet (vgl. Nachweis S6.1.1.1). Darüber hinaus werden zusätzlich zum IFTD Sicherheitsleiter als Beifahrer zur Unterstützung und Überwachung der IFTD eingesetzt, indem sie die übrigen Testaufgaben leiten und koordinieren [200]. Empfehlungen für Auswahl, Training und Überwachung von IFTDs wurden unter anderem von der AVSC in [112] veröffentlicht.

Auf Grundlage der etablierten Rolle des IFTD wird für diesen Anwendungsfall vorgeschlagen, den IFTD in Begleitung eines Sicherheitsleiters als Beifahrer als Referenz für die Ableitung eines kompetenten Fahrermodells zu verwenden. Konkret werden IFTDs betrachtet, die LKW der Klasse 8 (zulässiges Gesamtgewicht >33.001 lbs) fahren. Während der Hauptgrund für die Verwendung von IFTDs eine sichere Reaktion auf unerwartete gefährdende Situationen während der Straßenerprobung ist, stellt deren Auswahl und Ausbildung ebenfalls einen Ansatz zur Ableitung gesellschaftlich akzeptierter Fahrstandards dar. Beide Aspekte werden bei der Verwendung von IFTD-Fahrdaten als Grundlage für ein kompetentes Fahrermodell berücksichtigt.

### **6.1.2 Definition Akzeptanzkriterium im Vergleich zum IFTD als Referenzfahrer**

Im letzten Schritt wurde der IFTD als menschlicher Referenzfahrer ausgewählt. Im nächsten Schritt muss ein messbares Akzeptanzkriterium für die Bewertung des Systemverhaltens des SuT im Vergleich zum Referenzfahrer definiert werden. Als Akzeptanzkriterium für diesen Anwendungsfall wird die Ähnlichkeit des Fahrverhaltens des SuT zum Verhalten des IFTDs als Referenz für kompetentes Fahrverhalten definiert.

Das Kriterium basiert auf der Annahme des Safety II Konzepts, dass eine unangemessene Abweichung des ADS-Verhaltens vom kompetenten Fahrer zu unerwartetem Verhalten und Verkehrsstörungen führen und somit die gesellschaftliche Akzeptanz von ADS behindern kann [165]. Die Beurteilung der Ähnlichkeit erfolgt anhand von Fahrermodellen, die aus Fahrdaten des SuT sowie des IFTD abgeleitet werden. Als konkretes Maß wird der mittlere quadratische Fehler (engl. Root Mean Squared Error (RMSE)) zwischen der simulierten Geschwindigkeit eines abgeleiteten Fahrermodells und den gesammelten realen Fahrdaten verwendet. Um zusätzlich das SuT und den IFTD gegenüber einem durchschnittlichen Fahrer einzurordnen, wird aus Verkehrsüberwachungsdaten ein durchschnittliches Fahrermodell abgeleitet. Damit wird außerdem die Zulässigkeit des IFTD als kompetenter menschlicher Referenzfahrer überprüft.

Zusammenfassend wird als Akzeptanzkriterium definiert, dass das ADS-Verhalten dem IFTD als Referenz für einen geübten und aufmerksamen Fahrer ähnlicher sein soll als dem durchschnittlichen Fahrer (vgl. Nachweis S6.1.2).

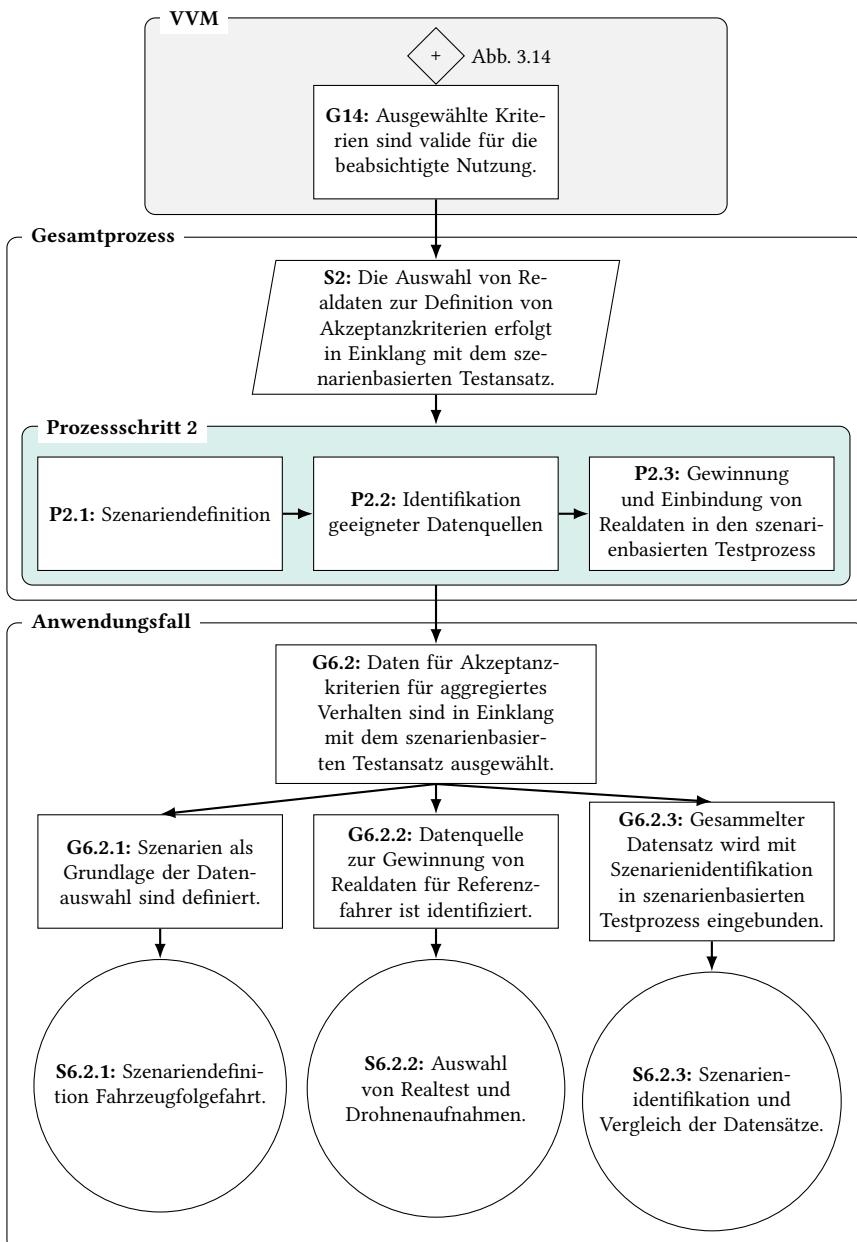
Hierbei ist zu betonen, dass die dargestellten Prozessschritte und Nachweise nur ein Akzeptanzkriterium für die Freigabeargumentation eines automatisierten Fahrzeugs darstellen. Die Einordnung und Nachvollziehbarkeit der GSN ermöglicht dabei die komplementäre Verwendung verschiedener notwendiger Akzeptanzkriterien als Ansatz zur Definition einer umfassenden Sicherheitsargumentation. Explizit nicht betrachtet werden z. B. die in Abschnitt 5.6 beschriebenen Einschränkungen der vereinfachten Abbildung der Sensorik, Fahrzeugaktorik sowie Hardware, die jeweils eigene oder angepasste Akzeptanzkriterien oder eine Abdeckung durch etablierte Entwicklungsprozesse wie ISO 26262 benötigen.

## 6.2 Szenarienbasierte Datenauswahl

Abb. 6.3 zeigt den aus Prozessschritt 2 (vgl. Abschnitt 5.1.2) resultierenden Teil der GSN in Abb. 6.1, der in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

### 6.2.1 Szenariendefinition

Als SuT wird die Verhaltens- und Planungssoftware von hochautomatisierten LKW der Klasse 8 (SAE-Level 4 [5]) betrachtet, die für den Warentransport zwischen Logistikzentren eingesetzt werden. Für dieses Anwendungsbeispiel wurde die ODD auf das Fahren auf Autobahnen in der südwestlichen Region der USA beschränkt.



Im Rahmen des Anwendungsfalls wird das Fahrzeugfolgeverhalten mit folgender Szenariendefinition untersucht (vgl. Nachweis S6.2.1):

1. Ego-Fahrzeug ist ein Nutzfahrzeug der Klasse 8
2. Gleichmäßige Folgefahrt: Nur Szenarien mit Beschleunigungen des Führungsfahrzeugs zwischen  $-2.0 \text{ m s}^{-2}$  und  $2.0 \text{ m s}^{-2}$  werden berücksichtigt
3. Autobahn mit einem Geschwindigkeitslimit von 65 mph
4. Mindestdauer des Szenarios von 2 s

Abb. 6.4 zeigt das Szenario Folgefahrt sowie die wichtigsten verwendeten Parameter. Die eingezeichnete THW berechnet sich als Quotient aus dem Abstand von Stoßstange zu Stoßstange und der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs.

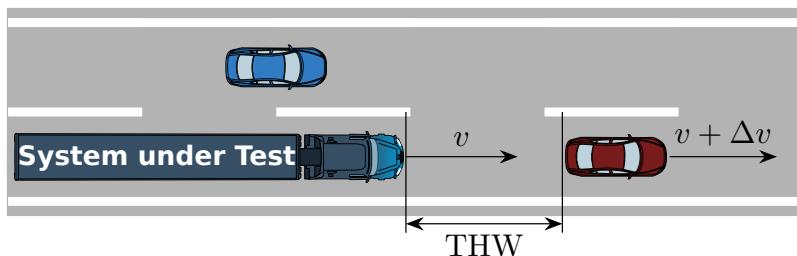


Abbildung 6.4: Darstellung des Szenarios Folgefahrt

## 6.2.2 Identifikation geeigneter Datenquellen

Zur Auswahl geeigneter Datenquellen werden die Bewertungskriterien in Tabelle 3.3 herangezogen. Zur Sammlung von IFTD-Daten ist eine gezielte Testkampagne basierend auf Realfahrten notwendig. Da das alltägliche Fahrverhalten untersucht werden soll, liegt eine gute Datenverfügbarkeit und Datenqualität sowie durch den Einsatz von IFTDs als Sicherheitsfahrer die beabsichtigte menschliche Referenz vor.

Für die Gewinnung eines durchschnittlichen Fahrermodells können NDS sowie Feldbeobachtungen eingesetzt werden. Um die genaue ODD des Anwendungsfalls abzubilden, bietet eine gezielte Feldbeobachtung mit Drohnen den vielversprechendsten Ansatz, um eine Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen (vgl. Abschnitt 3.3.3). Daher werden für die Sammlung von Daten für ein durchschnittliches Fahrermodell Aufnahmen mit Drohnen als Methode zur Datengewinnung ausgewählt, und der gewonnene Datensatz im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert. Alternativ können auch NDS eingesetzt und entsprechend der ODD-Definition gefiltert werden.

### 6.2.3 Gewinnung und Einbindung von Realdaten in den szenarienbasierten Testprozess

Basierend auf den identifizierten Datenquellen wurden IFTD- und Drohnendaten im Rahmen von Realtests und Feldbeobachtungen gesammelt. Die beiden Datensätze werden zuerst vorverarbeitet, einschließlich der Filterung von Szenarien mit LKW der Klasse 8 für die Drohnendaten (vgl. Abb. 6.5). Der Hauptverarbeitungsschritt verwendet eine Szenarienidentifikation, die auf der Methode StreetWise [91] zur Extraktion von Szenarien basiert (vgl. Abschnitt 3.3.1). Die identifizierten Szenarien werden anschließend verglichen und für die Parametrisierung der Fahrermodelle verwendet.

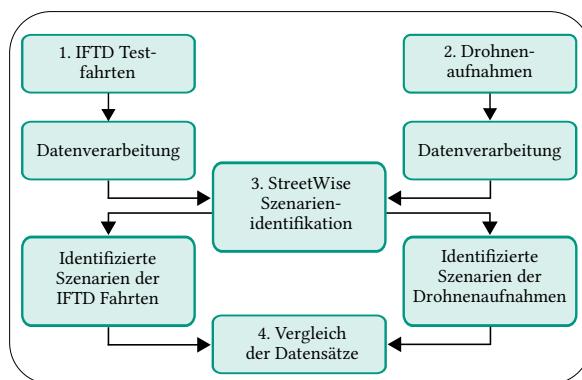


Abbildung 6.5: Datenquellen und Verarbeitungsschritte

### 6.2.3.1 IFTD-Datensatz

Der IFTD-Datensatz wurde bei Testfahrten im öffentlichen Straßenverkehr mit LKW der Klasse 8 gesammelt, während der IFTD die vollständige DDT manuell ausführt. Da das Ziel darin besteht, ein kompetentes Fahrermodell zu erstellen und nicht die Leistung des einzelnen Fahrers zu bewerten, werden die 23 an den Versuchsfahrten beteiligten IFTDs in der Analyse als Gruppe behandelt. Verschiedene Sensoren, einschließlich Kamera, Radar und Lidar, wurden in Kombination mit einem proprietären Objekterkennungsalgorithmus verwendet, um die Eigenschaften des Ego-Fahrzeugs und aller Verkehrsteilnehmer zu extrahieren.

### 6.2.3.2 Drohnen-Datensatz

Um Daten für die Modellierung eines durchschnittlichen Fahrers zu erhalten, wird ein Drohnen-Datensatz [201] verwendet. An einem Autobahnabschnitt auf der Interstate 40 in der Nähe von Albuquerque, New Mexico, wurden insgesamt sechs Stunden Drohnenaufnahmen gesammelt. Das Sichtfeld umfasste etwa 300 Meter in beide Fahrtrichtungen bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 65 mph (vgl. Abb. 6.6). Eine 3D-Erkennung und -Verfolgung aller Verkehrsteilnehmer wurde von DeepScenario<sup>1</sup> unter Verwendung verschiedener Computer-Vision-Algorithmen durchgeführt. Die Objektabmessungen und -bewegungen werden im metrischen Raum rekonstruiert und in einer HD-Karte des im Sichtfeld befindlichen Autobahnabschnitts dargestellt.

Der Hauptvorteil von Drohnenaufnahmen ist die unverdeckte Sicht auf alle Verkehrsteilnehmer aus der Vogelperspektive, verglichen mit der Verdeckung von Objekten bei einer Datenerfassung mit Onboard-Sensoren eines Testfahrzeugs. Aus Szenarienisicht kann jeder aufgezeichnete LKW der Klasse 8 als Ego-Fahrzeug betrachtet werden, was zu einer erhöhten Anzahl von

---

<sup>1</sup> <https://www.deepscenario.com/>

identifizierten Szenarien pro Zeit für die Erstellung einer durchschnittlichen Fahrerverteilung für den Aufzeichnungsort führt.



**Abbildung 6.6:** Drohnenaufnahme, annotiert mit dreidimensionalen Bounding-Boxen von DeepScenario

Die Gesamtzahl der in den sechs Stunden erfassten Fahrzeuge zeigt Tabelle 6.1.

**Tabelle 6.1:** Anzahl der erfassten Fahrzeugen im Drohnen-Datensatz

PKW	Klasse 8 LKW	Andere LKW	Bus	Motorrad	Gesamt
7657	2658	4539	43	59	14956

### 6.2.3.3 Szenarienidentifikation

Im nächsten Schritt wird eine Szenarienidentifikation für beide Datensätze basierend auf der StreetWise-Methode durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Verwendet wird die eingeführte Szenariendefinition der Fahrzeugfolgefahrt in Abschnitt 6.2.1.

Für den IFTD Datensatz werden nur Szenarien mit einer mittleren Geschwindigkeit von mindestens 36.1 mph ausgewählt. Diese Grenze wurde basierend

auf der niedrigsten auftretenden Geschwindigkeit im Drohnen-Datensatz gewählt, da in den Aufzeichnungszeiträumen keine Staus oder stockender Verkehr aufgetreten sind

Als Ergebnis der Szenarienidentifikation wurden insgesamt 3.068 Szenarien im IFTD-Datensatz und 1.029 Szenarien im Drohnen-Datensatz identifiziert.

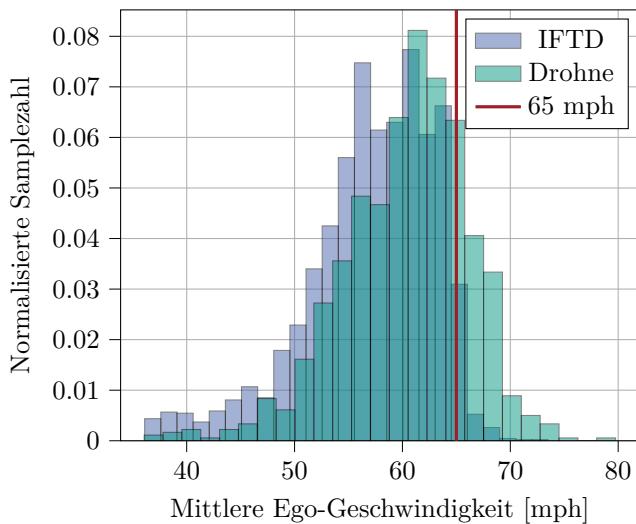
#### 6.2.3.4 Vergleich der Datensätze

Um die Auswahl des IFTD als zulässige Referenz für kompetentes Fahren zu bestätigen, wird die folgende Hypothese durch einen Vergleich des IFTD- und Drohnen-Datensatzes untersucht: „Der IFTD, in Begleitung eines Sicherheitsleiters als Beifahrer, ist eine angemessene Referenz für geübtes und aufmerksames Fahrverhalten im Vergleich zu einem durchschnittlichen Fahrer.“

In einem Bericht der NHTSA über Pre-Crash-Szenarien identifizieren Toma et al. [202] überhöhte Geschwindigkeit  $v$  und unsichere Folgeabstände  $s$  als Hauptfaktoren für Auffahrunfälle von LKW in den USA (vgl. Abb. 6.4). Daher werden beide Faktoren für den durchschnittlichen Fahrer im Drohnen- und IFTD-Datensatz untersucht.

Die Verteilung der mittleren Ego-Geschwindigkeit  $v$  pro identifiziertem Szenario für die Fahrer aus dem IFTD- und Drohnen-Datensatz mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 65 mph ist in Abb. 6.7 dargestellt.

Der Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung für die IFTD-Szenarien beträgt 57.1 mph (Standardabweichung 6.01 mph) und in 3 % der Szenarien wird das Geschwindigkeitslimit von 65 mph überschritten. Für den Drohnen-Datensatz beträgt der Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung 60.4 mph (Standardabweichung 5.81 mph) und in 20 % der Szenarien wird das Geschwindigkeitslimit überschritten. Als statistisches Maß zum Vergleich der Ähnlichkeit zweier Parameterverteilungen wird der dafür entwickelte zweiseitige Kolmogorov-Smirnov (KS)-Test [203] eingesetzt. Für die beiden Geschwindigkeitsverteilungen widerlegt der KS-Test die Nullhypothese von identischen Verteilungen mit  $p < 0.001$  und bestätigt die Unterschiede der Verteilungen quantitativ.



**Abbildung 6.7:** Verteilung der mittleren Ego-Geschwindigkeit während der Folgefahrt-Szenarien

Als zweiter Faktor wird die Verteilung der mittleren THW des Ego zum vorausfahrenden Fahrzeug in den identifizierten Szenarien verglichen (vgl. Abb. 6.8). Der Mittelwert der THW für die IFTD-Szenarien liegt bei 3.49 s (Standardabweichung 1.09 s) und bei 2.74 s (Standardabweichung 1.23 s) für die Drohnendaten. Ein Zeitabstand von weniger als 2 s wurde in 10 % der IFTD-Szenarien identifiziert, im Gegensatz zu 32 % für den Drohnen-Datensatz. Es ist darauf hinzuweisen, dass kleine Zeitabstände auch vom Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer abhängig sind und sich nicht vollständig vermeiden lassen. Wenn z. B. ein Einscheren eines anderen Fahrzeugs vor dem Ego dem Folgefahrt-Szenario vorausgeht, kann der anfängliche Zeitabstand gering sein, bis das Folgefahrzeug in Abhängigkeit vom eigenen Verhalten wieder einen größeren Abstand herstellen kann. Dieser Effekt wird für die mittlere THW während der Szenarien sichtbar, der eine deutliche Verschiebung hin zu größeren Abständen für den IFTD gegenüber dem

Drohnen-Datensatz zeigt. Wie bei den Geschwindigkeitsverteilungen widerlegt der zweiseitige KS-Test die Nullhypothese identischer Verteilungen mit  $p < 0.001$ .

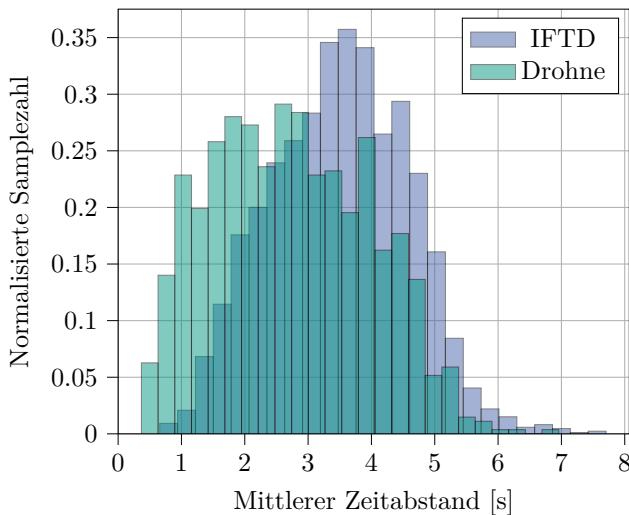


Abbildung 6.8: Verteilung der mittleren THW während der Folgefahrt-Szenarien

Die gesammelten Daten zeigen, dass die IFTD niedrigere Geschwindigkeiten und größere Zeitabstände einhalten, was die gestellte Hypothese stützt, dass der IFTD im Vergleich zum Durchschnittsfahrer einen angemessenen menschlichen Referenzfahrer für geübtes und aufmerksames Fahrverhalten darstellt. Das Fahrverhalten spiegelt die umfangreichen Auswahl- und Schulungsprozesse der für die Fahrversuche eingesetzten IFTDs und Sicherheitsleiter wieder. Dazu gehören die Überprüfung von Fahrprotokollen und -erfahrungen sowie die Ausbildung in Kursen, auf dem Testgelände und auf der Straße. Insgesamt wurden Geschwindigkeitsübertretungen sechsmal häufiger und mit höheren Maximalgeschwindigkeiten für den Durchschnittsfahrer im Drohnen-Datensatz im Vergleich zum IFTD beobachtet. Die mittlere THW für den IFTD war 27 % größer im Vergleich zum Durchschnittsfahrer, wobei dreimal weniger Szenarien mit Zeitabständen unter 2 s auftraten.

## 6.3 Anwendung der Akzeptanzkriterien als Teil der szenarienbasierten Freigabeargumentation

Abb. 6.9 zeigt den aus Prozessschritt 3 (vgl. Abschnitt 5.1.3) resultierenden Teil der GSN in Abb. 6.1, der in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

### 6.3.1 Szenarienbasierte Modelldefinition

Auf Grundlage der identifizierten Szenarien wird im nächsten Schritt ein geeignetes Fahrermodell ausgewählt und mit den IFTD-Daten kalibriert, um ein menschliches Fahrermodell abzuleiten. Für das betrachtete Folgefahrt-Szenario existieren verschiedene längsdynamische Fahrermodelle, die das Fahrzeugfolgeverhalten abbilden (vgl. Abschnitt 3.3.6.4).

Im Folgenden wird das weit verbreitete IDM von Treiber et al. [171] ausgewählt, um ein IFTD-Modell für das Szenario der Folgefahrt abzuleiten. Für die Verwendung als Referenzmodell bietet das IDM den Vorteil der intuitiven Definition der verwendeten Parameter, was den direkten Vergleich der Fahreigenschaften für verschiedene Modellparameter erlaubt. Die Einführung der Modellgleichungen und eines Optimierungsansatzes zur Kalibrierung des IDM mit gesammelten Fahrdaten findet sich in Abschnitt 3.3.6.4. Für die Berechnung des zeitdiskreten IDM wurde für beide Datensätze eine feste Schrittweite von 50 ms (20 Hz) verwendet.

Als Ergebnis der Optimierung zeigt Tabelle 6.2 die Parameter des IDM, die mit der Kalibrierung des IDM für den IFTD-Datensatz berechnet wurden. Dabei wurden die angegebenen IDM-Parametergrenzen verwendet.

Tabelle 6.2: Parametergrenzen und kalibrierte Parameter des IDM für den IFTD-Datensatz

	$a[\text{m s}^{-2}]$	$b[\text{m s}^{-2}]$	$\delta[-]$	$s_0[\text{m}]$	$T_0[\text{s}]$	$v_0[\text{m s}^{-1}]$
min	0.1	0.1	2.0	2.0	0.5	20
max	6.0	6.0	4.0	5.0	6.0	40
IFTD	0.26	6.00	2.00	5.00	1.92	30.67

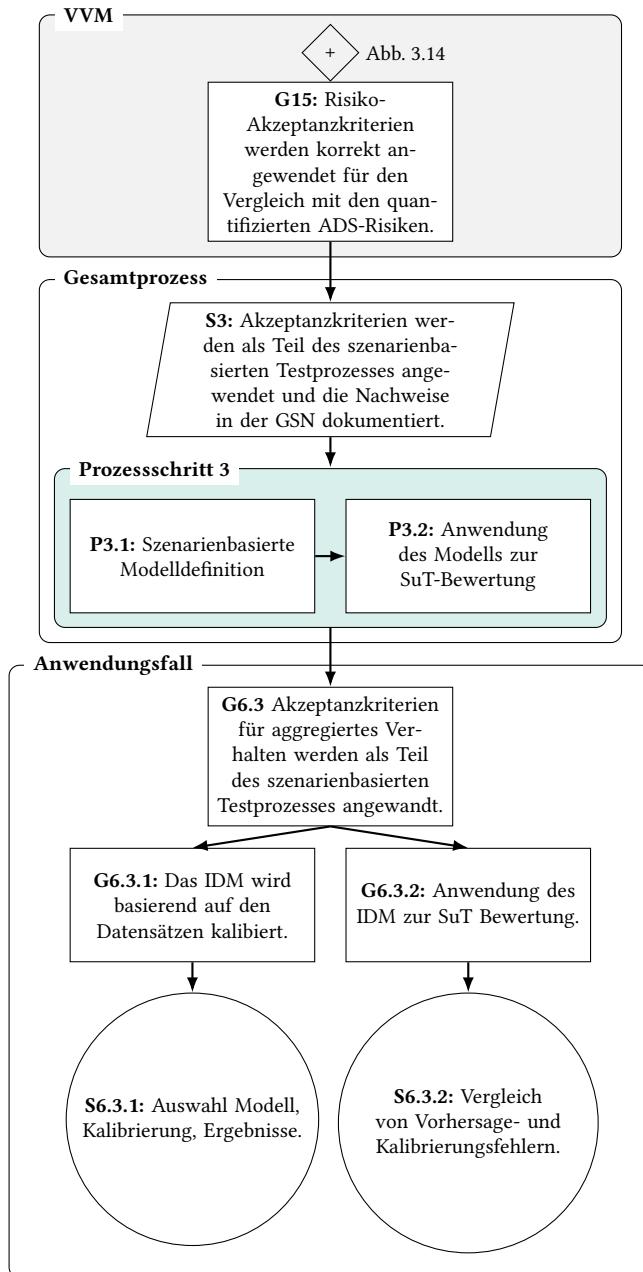


Abbildung 6.9: Ergebnis GSN Prozessschritt 3 (vgl. Abb. 6.1)

Die intuitive Definition der IDM-Parameter erlaubt eine Plausibilisierung der Kalibrierungsergebnisse. Die gewünschte Geschwindigkeit  $v_0$  liegt am oberen Ende der aufgezeichneten Geschwindigkeitsverteilung (siehe Abb. 6.7), während der gewünschte Zeitabstand  $T_0$  nahe dem unteren Ende der Zeitabstandsverteilung liegt (vgl. Abb. 6.8). Dabei ist zu beachten, dass die in Abb. 6.8 gezeigte tatsächliche THW größer als der gewünschte Zeitabstand  $T_0$  ist, da der gewünschte Abstand des IDM gemäß Gleichung (3.2) den statischen Mindestabstand  $s_0$  und einen dynamischen Term enthält, der von der Geschwindigkeitsdifferenz zum führenden Fahrzeug abhängt. Da das Szenario einer gleichmäßigen Folgefahrt mit kleinen Beschleunigungen des Ego-Fahrzeugs betrachtet wird, resultiert ein niedriger Wert der maximalen Beschleunigung  $a$ . Durch die gegenseitige Beeinflussung der Parameter für die Beschleunigung  $a$  und Komfortverzögerung  $b$  in Gleichung (3.2) folgt eine Komfortverzögerung  $b$  an der oberen vorgegebenen Parametergrenze.

Der Beschleunigungsexponent  $\delta = 2$  liegt an der unteren Parametergrenze, was auf eine sanftere Verringerung der Beschleunigung für LKW beim Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit hinweist, verglichen mit dem Wert  $\delta = 4$ , der üblicherweise für PKW verwendet wird (vgl. Abschnitt 3.3.6.4). Der Mindestabstand  $s_0 = 5 \text{ m}$  entspricht der oberen Parametergrenze und ist damit größer als der üblicherweise für PKW verwendete Wert von  $s_0 = 2 \text{ m}$  [171], [173]. Der erhöhte Wert repräsentiert die praktische Bedeutung des Parameters, da LKW-Fahrer im Vergleich zu Pkw einen größeren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhalten, um auch im Stau manövrierfähig zu bleiben und bei Bedarf Ausscheren zu können. Daher werden die Optimierungsergebnisse  $\delta = 2$  und  $s_0 = 5 \text{ m}$  als feste Parameter gesetzt, was den Rechenaufwand für die wiederholte Kalibrierung mit dem Bootstrap-Verfahren im nächsten Schritt reduziert.

Die globale optimale Lösung für den IFTD-Datensatz, die Mittelwerte und die 95 % Konfidenzintervalle der IDM-Parameter aus 1.000 Bootstrap-Stichproben sind in Tabelle 6.3 dargestellt.

**Tabelle 6.3:** Optimale Lösung, Stichprobenmittelwerte und 95 % Konfidenzintervalle der IDM-Parameter für den IFTD-Datensatz

<b>IFTD</b>	$a[\text{m s}^{-2}]$	$b[\text{m s}^{-2}]$	$T_0[\text{s}]$	$v_0[\text{m s}^{-1}]$
Optimale Lösung	0.26	6.00	1.92	30.67
Bootstrap Mittelwert	0.26	6.00	1.93	30.74
95 %	(0.22,	(6.00,	(1.78,	(30.01,
Konfidenzintervall	0.30)	6.00)	2.10)	31.70)

**6.3.1.1 Vergleich zum Drohnen-Datensatz**

Für den Vergleich der IFTD-Parameter werden auch für den Drohnen-Datensatz die optimale Lösung, Mittelwerte und die 95 % Konfidenzintervalle der IDM-Parameter aus 1.000 Bootstrap-Stichproben betrachtet (vgl. Tabelle 6.4).

**Tabelle 6.4:** Optimale Lösung, Stichprobenmittelwerte und 95 % Konfidenzintervalle der IDM-Parameter für den Drohnen-Datensatz

<b>Drohne</b>	$a[\text{m s}^{-2}]$	$b[\text{m s}^{-2}]$	$T_0[\text{s}]$	$v_0[\text{m s}^{-1}]$
Optimale Lösung	0.34	6.00	1.04	39.32
Bootstrap Mittelwert	0.35	6.00	1.02	38.68
95 %	(0.30,	(6.00,	(0.86,	(35.42,
Konfidenzintervall	0.44)	6.00)	1.18)	40.0)

Wie zuvor für die IFTD-Kalibrierung, werden die Parameter  $\delta = 2$  und  $s_0 = 5 \text{ m}$  als feste Parameter gewählt, um die Vergleichbarkeit der vier kalibrierten Parameter mit den IFTD-Bootstrapping-Ergebnissen sicherzustellen. Die Resultate zeigen einen 46 % niedrigeren Wert von  $T_0$  und einen 28 % höheren Wert von  $v_0$  im Vergleich zum IFTD-Modell. Damit spiegeln die Parameter und das kalibrierte Fahrermodell die in Abschnitt 6.2.3.4 diskutierten geringeren Folgeabstände und höheren Maximalgeschwindigkeiten der Fahrer im Drohnen-Datensatz im Vergleich zum IFTD wieder.

### 6.3.2 Anwendung des Modells zur SuT-Bewertung

Die szenarienbasierte Modelldefinition ermöglicht eine direkte Integration in den szenarienbasierten Testprozess. Die szenarienbasierte Definition des kompetenten Fahrermodells hat den großen Vorteil, dass SuT-Daten, die mit der Szenarienbeschreibung übereinstimmen, mit demselben Szenarienidentifikationsansatz wie für die IFTD- und Drohnen-Datensätze extrahiert werden. Außerdem ist die Methode sowohl für reale Test- als auch für Simulationsdaten anwendbar (vgl. Anforderung 2), da beide Datenquellen mit der gleichen Szenarienidentifikation verarbeitet werden und eine einheitliche Basis aus verschiedenen Datenquellen geschaffen wird.

Die Ähnlichkeit des ADS-Fahrverhaltens mit dem IFTD-Modell wird als Akzeptanzkriterium über das GSN als Teil der Freigabeargumentation verwendet. In diesem Fall liegt der Fokus auf dem alltäglichen Fahrverhalten und der Bewertung des Systemverhaltens gegenüber einem geübten und aufmerksamen menschlichen Referenzfahrer.

Zur SuT-Bewertung wird ein Datensatz eines ADS mit 1.147 Szenarien aus der Straßenerprobung eines SAE-Level 4 [5] LKW der Klasse 8 eingesetzt. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird dieselbe ODD, Szenariendefinition und Szenarienidentifikation verwendet, wie für den IFTD- und Drohnen-Datensatz (vgl. Abschnitt 6.2.1). Ebenso wird derselbe Kalibrierungs- und Bootstrapping-Ansatz auf den realen Testdatensatz des SuT angewendet. Die resultierenden Parameter und Konfidenzintervalle aus 1.000 Bootstrap-Stichproben sind in Tabelle 6.5 dargestellt. Das Ergebnis beinhaltet den höchsten Wert des gewünschten Zeitabstands  $T_0$ , womit das Modell die größten Abstände zum Führungsfahrzeug der drei Modelle einhält.

**Tabelle 6.5:** Optimale Lösung, Stichprobenmittelwerte und 95 % Konfidenzintervalle der IDM-Parameter für den SuT-Datensatz

SuT	$a[\text{m s}^{-2}]$	$b[\text{m s}^{-2}]$	$T_0[\text{s}]$	$v_0[\text{m s}^{-1}]$
Optimale Lösung	0.28	4.36	2.68	33.37
Bootstrap Mittelwert	0.28	4.34	2.69	33.49
95 %	(0.22, 0.33)	(3.74, 4.91)	(2.47, 2.95)	(32.02, 35.42)
Konfidenzintervall				

Im nächsten Schritt wird das Akzeptanzkriterium geprüft, ob das Verhalten des SuT dem abgeleiteten IFTD-Fahrermodell ähnlich ist. Für im Realtest aufgezeichnete und mit der Szenarienidentifikation extrahierte Szenarien des SuT wird das kalibrierte IFTD-Modell unter Verwendung der initialen Geschwindigkeiten von Ego-Fahrzeug und Führungsfahrzeug sowie der Distanz als Startwerte eingesetzt. Mit dem kompetenten Fahrermodell wird die Geschwindigkeit und Position des nachfolgenden Fahrzeugs für jeden Zeitschritt des Szenarios berechnet (unter Verwendung von 50 ms/20 Hz wie bei der Kalibrierung). Die simulierte IDM-Trajektorie wird dann mit der aufgezeichneten Trajektorie des SuT verglichen.

Das Akzeptanzkriterium wird ausgewertet, indem der mittlere quadratische Fehler (engl. RMSE) zwischen der simulierten und aufgezeichneten Geschwindigkeit für alle Kombinationen der optimalen Lösungen der IDM-Kalibrierung und den zugrundeliegenden Datensätzen für IFTD, Drohne und SuT berechnet wird (vgl. Tabelle 6.6).

**Tabelle 6.6:** RMSE der Geschwindigkeit berechnet für alle Kombinationen der optimalen IDM-Parameter und Datensätze für IFTD, Drohne und SuT

Optimale Lösung IDM			
RMSE [m/s]	IFTD	Drone	SuT
IFTD	0.548	0.981	0.602
Drohne	0.563	0.429	0.732
SuT	0.502	1.154	0.490

Erstens zeigt der RMSE der Geschwindigkeit, dass der niedrigste Fehler pro Datensatz für die auf diesem Datensatz kalibrierte optimale IDM-Lösung erreicht wird und bestätigt den Ansatz zur IDM-Kalibrierung. Zweitens ist der mit den optimalen IFTD-Parametern für den SuT-Datensatz berechnete Vorhersagefehler von  $0.502 \text{ m s}^{-1}$  nur 2 % höher als der Kalibrierungsfehler von  $0.490 \text{ m s}^{-1}$  für die optimalen SuT-Parameter. Dies weist auf eine Ähnlichkeit im Verhalten der IFTDs und des SuT hin. Drittens ist der mit den optimalen

IDM-Parametern des Drohnen-Datensatzes für den SuT-Datensatz berechnete Vorhersagefehler von  $1.154 \text{ m s}^{-1}$  um 136 % höher als der Kalibrierungsfehler von  $0.490 \text{ m s}^{-1}$  für die optimalen SuT-Parameter. Damit wird ein signifikanter Unterschied im durchschnittlichen Verhalten der Fahrer im Drohnen-Datensatz und dem SuT gezeigt.

Zusammenfassend zeigt der Unterschied zwischen den Vorhersagefehlern und den Kalibrierungsfehlern für den SuT-Datensatz eine höhere Ähnlichkeit zwischen dem SuT- und dem IFTD-Verhalten im Gegensatz zum durchschnittlichen Fahrer im Drohnen-Datensatz. Das Ergebnis bestätigt das Akzeptanzkriterium (vgl. Abschnitt 6.1.2) der Ähnlichkeit des SuT-Verhaltens zum IFTD als Referenz für ein geübtes und aufmerksames Fahrermodell im Vergleich zu einem durchschnittlichen Fahrer.

## 6.4 Zusammenfassung und Fazit

Der erste Anwendungsfall zeigt eine praktische Implementierung des in Abschnitt 5.1 vorgeschlagenen Prozesses im Rahmen der Freigabeargumentation von hochautomatisierten Nutzfahrzeugen.

Dabei wird ein Akzeptanzkriterium für das aggregierte Verhalten hochautomatisierter Nutzfahrzeuge auf Basis eines menschlichen Referenzfahrers für das alltägliche Folgefahrt-Szenario vorgeschlagen (Prozessschritt 1). Das Akzeptanzkriterium betont die notwendige Betrachtung der Erwartungen an vorhersehbares und verantwortungsvolles Verhalten von ADS gegenüber anderen Verkehrsteilnehmer als Ergänzung zur Identifikation und Evaluierung von sicherheitskritischen Szenarien. Aufbauend auf der etablierten Rolle des IFTD für eine sichere Erprobung auf öffentlichen Straßen wird die Verwendung des IFTD als Referenzfahrer definiert und im GSN eingeordnet (vgl. Nachweis S6.1.2).

Der Vergleich der gesammelten IFTD- und Drohnen-Datensätze (vgl. Nachweis S6.2.3) zeigt die Möglichkeit des IFTD als geübtem und aufmerksamen Referenzfahrer im Vergleich zu einem durchschnittlichen Fahrer (Prozessschritt 2). Die Unterschiede der Parameter des IDM, die separat auf die

Fahrdaten von 23 IFTDs und dem Durchschnittsfahrer am Drohnenstandort kalibriert wurden, repräsentieren die Merkmale des größeren Folgeabstands und der strengeren Einhaltung des Geschwindigkeitslimits für den IFTD, die in den gesammelten Folgefahrt-Szenarien beobachtet wurden (vgl. Nachweis S6.3.1).

Im letzten Schritt bestätigt die Auswertung der Kalibrierungs- und Vorhersagefehler des IDM auf den SuT-Daten die größere Ähnlichkeit des SuT Verhaltens mit dem Modell des geübten Fahrers im Gegensatz zum Modell des durchschnittlichen Fahrers am Standort des Drohnen-Datensatz (vgl. Nachweis S6.3.2). Der Prozess bietet einen praktisch anwendbaren Ansatz zur szenarienbasierten Definition von Fahrermodellen für alltägliches Fahrverhalten und die Auswertung von Akzeptanzkriterien für hochautomatisierte Nutzfahrzeuge im Vergleich zu einem menschlichen Referenzfahrer (Prozessschritt 3).

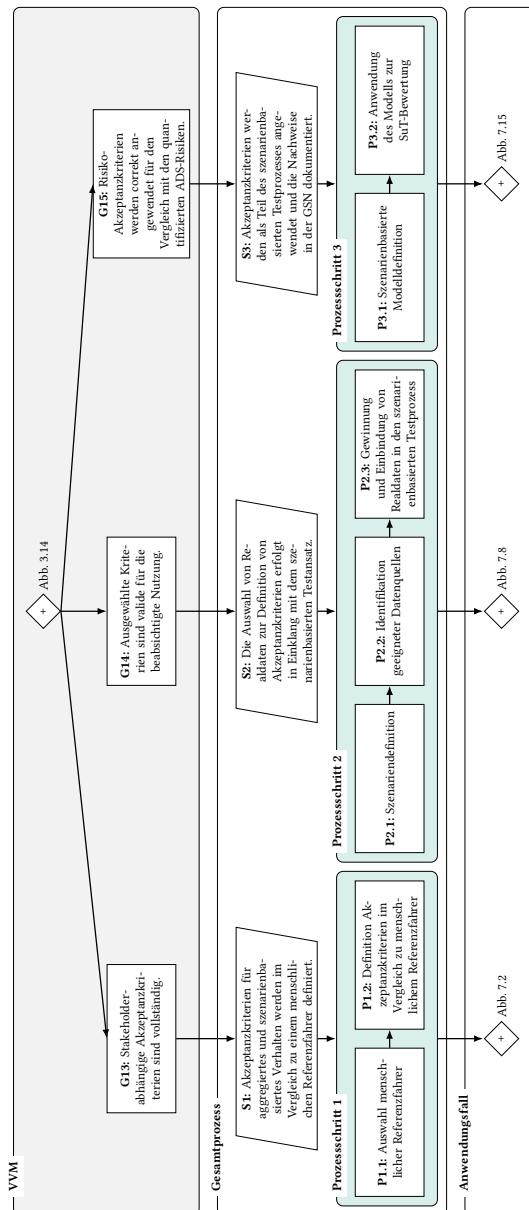
Zu den Einschränkungen des Anwendungsbeispiels gehört, dass im verwendeten Fahrermodell nicht berücksichtigte Effekte zu falsch positiven Ergebnissen bei der Erkennung von Abweichungen führen können. Während die durchgeführte Auswertung der Kalibrierungs- und Vorhersagefehler die grundsätzliche Ähnlichkeit des Verhalten in den Datensätzen zeigt, hängt ein Einzelfallvergleich ebenfalls vom Fahrermodell ab. Da das IDM nur das Verhalten des führenden Fahrzeugs berücksichtigt, wurde eine Reaktion auf Fahrzeuge auf benachbarten Fahrspuren oder bei unterschiedlichen Wetterbedingungen nicht berücksichtigt. Um den Einfluss anderer Faktoren auf das menschliche Verhalten genau abzubilden, wären zusätzliche Untersuchungen zur Erweiterung der kompetenten Fahrermodelle erforderlich. Außerdem sind für den Übergang des Prozesses zu einer kommerziellen Anwendung größere Datensätze einschließlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten erforderlich. Eine NDS kann zur Bewertung von Routinefahrten und sicherheitskritischen Fällen verwendet werden, sowie zusätzliche Dronendaten zur breiteren Abdeckung aller Bedingungen in der ODD gesammelt werden.

Im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten ist die Anwendung des Prozesses für weitere Szenarien und die Entwicklung neuer Fahrermodelle von Interesse. Während die Analyse als Teil des Post-Processings durchgeführt wurde, kann der Ansatz auch zur Onboard-Überwachung erweitert werden, vergleichbar mit dem Shadow-Mode-Test, um Abweichungen vom geübten und aufmerksamen Fahrverhalten während der SuT-Erprobung oder kommerziellen Anwendung zu erkennen.

## **7 Anwendung auf szenarienbasierte Akzeptanzkriterien für hochautomatisierte Nutzfahrzeuge**

Der in Kapitel 5 definierte Prozess wird im zweiten Anwendungsfall mit dem Ziel eingesetzt, ein Fahrermodell mit Fokus auf die Unfallvermeidung in kritischen Szenarien als Akzeptanzkriterium für das szenarienbasierte Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge zu definieren. Während auch aggregierende Akzeptanzkriterien, wie die positive Risikobilanz bezogen auf die Unfallrate im Vergleich zum menschlichen Fahrer, zur Bewertung des Systemverhaltens in kritischen Szenarien zum Einsatz kommen, ist die zusätzliche Verwendung von szenarienbasierten Akzeptanzkriterien notwendig zur umfassenden Argumentation der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos nach ISO 21448 (vgl. Abschnitt 3.3.6 und Anforderung 4).

Als strukturierter Beitrag zur Freigabeargumentation ergibt sich als Ergebnis des vorgeschlagenen Prozesses die GSN in Abb. 7.1, bei dem das Simulationsmodell FSM aus UN-Regelung Nr. 157 erweitert und als Akzeptanzkriterium verwendet wird. Dabei fokussiert sich der Anwendungsfall auf kritische Szenarien und die Herausforderung, geeignete kritische Realdaten zu gewinnen, und in den szenarienbasierten Testprozess einzubinden (vgl. Abschnitt 3.3.2 und Anforderung 5).



**Abbildung 7.1:** GSN der VVM-Sicherheitsargumentation (vgl. Abb. 3.14) erweitert um Gesamtprozess (vgl. Abb. 5.6) und Ergebnisse des Anwendungsfalls eines Fahrermodells als Akzeptanzkriterium für kritische Szenarien

## 7.1 Definition und Einordnung

### Akzeptanzkriterium für szenarienbasiertes Verhalten

Abb. 7.2 zeigt den aus Prozessschritt 1 (vgl. Abschnitt 5.1.1) resultierenden Teil der GSN in Abb. 7.1, dessen Herleitung in den folgenden Abschnitten diskutiert wird. Aus dem Prozess abgeleitete und im GSN neu hinzugefügte Ziele und Nachweise werden folgend den Prozessschritten nummeriert. In Kapitel 7 wird für die Nummerierung der Ziele und Nachweise „G7.X“ und „S7.X“ verwendet, wodurch eine direkte Zuordnung zwischen GSN-Elementen und Textabschnitten hergestellt wird (z. B. wird Ziel G7.1.1 in Abschnitt 7.1.1 beschrieben).

#### 7.1.1 Auswahl eines menschlichen Referenzfahrers

Für die Beschreibung eines menschlichen Referenzfahrers zur szenarienbasierten Bewertung des Systemverhaltens wurden verschiedene menschliche Referenzmodelle entwickelt. Wie in Abschnitt 3.3.6 diskutiert, existieren proprietäre Modelle wie NIEON [162] und SCM [110], mit denen die menschliche Performance bei der Unfallvermeidung modelliert wird. Als bisher einzige für die Typgenehmigung relevante Verordnung definiert die UN-Regelung Nr. 157 [177] menschliche Referenzmodelle, deren Performance maßgeblich für die notwendige Unfallvermeidung eines ALKS ist. Wie in Abschnitt 4.1.4 gezeigt wurde, stellt das FSM das sicherste und generischste der drei in der Regelung definierten Modelle dar.

Aufgrund der Bedeutung für die Zulassung automatisierter Fahrzeuge, der öffentlichen Verfügbarkeit des Modells sowie der Modellperformance, wird in dieser Dissertation das FSM als Ausgangspunkt für die Definition eines menschlichen Referenzfahrers ausgewählt.

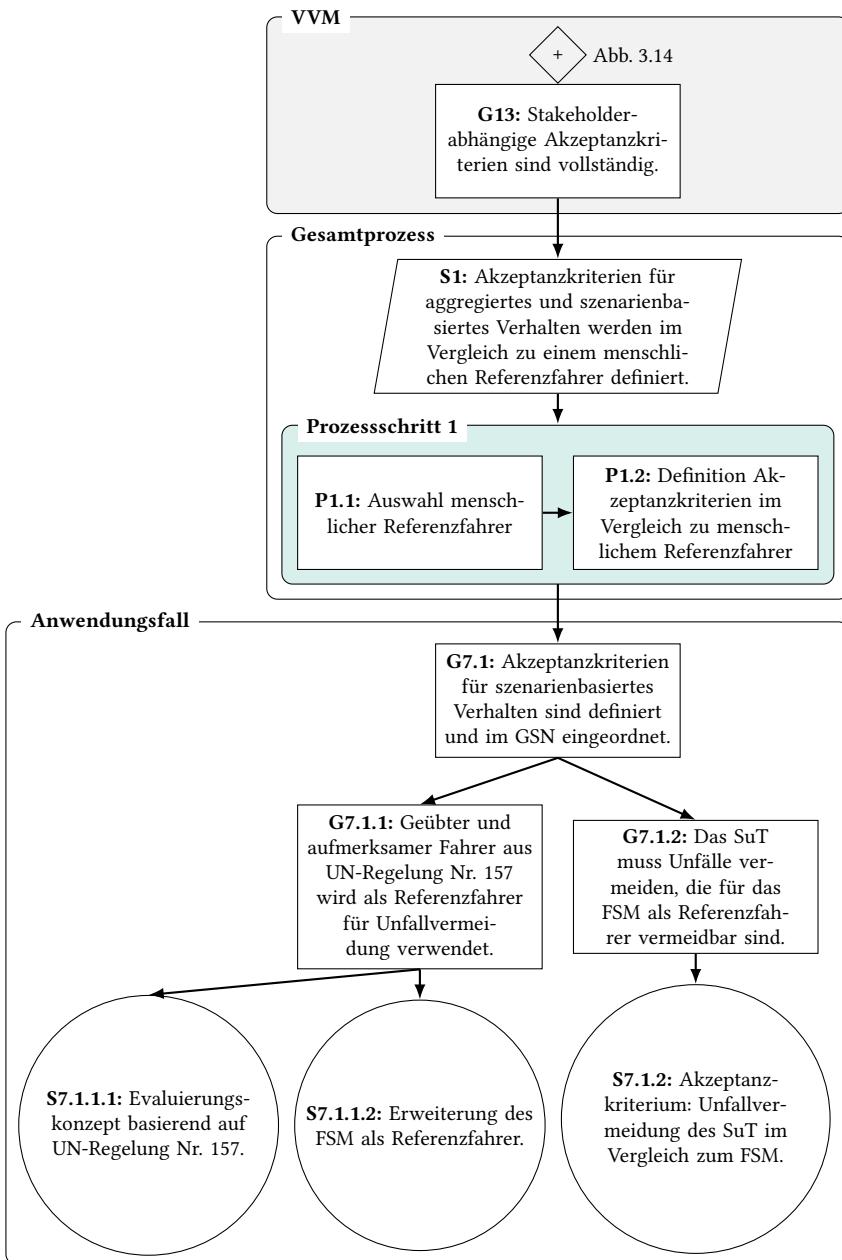


Abbildung 7.2: Ergebnis GSN Prozessschritt 1 (vgl. Abb. 7.1)

Das FSM basiert auf einem geübten und aufmerksamen menschlichen Fahrer als Referenz und kann für die Einzelfallbewertung eines konkreten Szenarios als szenarienbasiertes Akzeptanzkriterium eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.3.6). Während das FSM im Rahmen der UN-Regelung Nr. 157 [177] für die Typgenehmigung von ALKS nach SAE-Level 3 entwickelt wurde, wird im Rahmen dieser Dissertation die Anwendung und Erweiterung des Modells für hochautomatisierte Fahrzeuge nach SAE-Level 4 untersucht. Für die Weiterentwicklung des Referenzmodells wird gefordert, dass ein gleich hohes oder reduziertes Systemrisiko im Vergleich zu den in [177] definierten ALKS-Leistungsmodellen erreicht wird. Dies basiert auf der Annahme, dass Systeme mit SAE-Level 4 mindestens die gleiche Performance in Bezug auf die Kollisionsvermeidung wie ALKS nach SAE-Level 3 erreichen müssen.

Für die praktische Anwendung der Referenzmodelle im szenarienbasierten Testprozess sind verschiedene Annahmen notwendig, die in UN-Regelung Nr. 157 [177] nicht spezifiziert wurden und im nachfolgenden Evaluierungskonzept diskutiert werden.

### **7.1.1.1 Evaluierungskonzept**

Zur Evaluierung der in Abschnitt 4.1 eingeführten ALKS-Referenzmodelle für Real- oder Simulationsdaten können zwei alternative Ansätze eingesetzt werden.

Die erste Methode ist die Identifikation eines konkreten ALKS-Szenarios basierend auf der Parameterdefinition in [177] und die Evaluierung des Modells ausgehend von den beobachteten Szenarioparametern. Tenbrock et al. [83] verwenden einen ähnlichen Ansatz zur Ableitung von konkreten Szenarien aus Realdaten. Dabei wird zunächst identifiziert, welches der drei ALKS-Szenarien das aktuelle Szenario am besten beschreibt, und anschließend die Parametrisierung des konkreten Szenarios extrahiert. Der Vorteil der Methode besteht darin, dass die Referenzmodelle durch die Szenarioidentifikation nur in den definierten Szenarien ausgewertet werden, und somit die Modellgrenzen berücksichtigt werden.

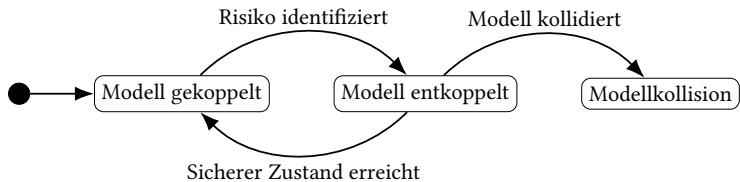
Nachteilig ist hingegen der Kontextverlust durch die vereinfachte ALKS-Szenariendefinition, die z. B. zusätzliche Fahrzeuge nicht berücksichtigt, obwohl diese Einfluss auf das Szenario haben. Folglich ist nicht garantiert, dass für ein konkretes Szenario ein repräsentatives ALKS-Szenario identifiziert werden kann. Zweitens führt die Reduzierung auf den vereinfachten Parameterraum aus [177] zu einem Informationsverlust bezüglich der Modellierungstiefe des Szenarios, wie z. B. von de Geler in [193] gezeigt wurde. Beispielsweise werden in den Einscher- und Ausscherszenarien in [177] die longitudinalen Geschwindigkeiten der Akteure vereinfacht als während des gesamten Szenarios konstant angenommen.

Als alternative Methode wird ein Simulationsmodell auf Grundlage der ALKS-Spezifikation vorgeschlagen, das über die spezifischen Definitionen der ALKS-Szenarien hinaus anwendbar, und damit effizienter in den szenarienbasierten Testprozess integrierbar ist. Ziel des Simulationsmodells ist die Bewertung, ob in einem kritischen Szenario eine Kollision durch das Referenzmodell verhindert werden kann, um die Leistung des SuT in diesem konkreten Szenario zu bewerten. Als Teil des Simulationsmodells wird ein Reaktionsmodell definiert, das die Anwendung des Modells für mehrere Verkehrsteilnehmer ermöglicht. Dies wird in UN-Regelung Nr. 157 [177] nicht berücksichtigt, ist jedoch notwendig für die Bewertung von realen Fahrdaten oder Simulationsszenarien mit höherer Modellierungstiefe.

Außerdem sind die in UN-Regelung Nr. 157 [177] spezifizierten Referenzmodelle ausschließlich für die Unfallvermeidung konzipiert, womit ihr Schwerpunkt auf der Modellierung der Reaktion eines menschlichen Fahrers in einem Verkehrskonflikt liegt. Andere Aspekte des Fahrverhaltens sind kein Teil der Modelldefinition, wie z. B. Routenplanung, kooperatives Verhalten gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern oder die Einhaltung von Verkehrsregeln. Dies stellt eine Herausforderung für den Vergleich des SuT und des Referenzmodells in einem konkreten Szenario dar, da ein SuT nach SAE-Level 4 auch diese Aspekte der Fahraufgabe ausführt. Unterschiedliche Reaktionen in unkritischen Phasen eines Szenarios vor einem Verkehrskonflikt führen zu einer Divergenz zwischen dem simulierten Referenzmodell und dem SuT, wodurch

die Vergleichbarkeit in der folgenden kritischen Situation eingeschränkt werden kann. Daher wird das nachfolgende Evaluierungskonzept der Referenzmodelle vorgeschlagen, das auf die Vergleichbarkeit zwischen Modell und SuT sowohl in kritischen als auch unkritischen Szenarien abzielt.

Das Konzept wird mit einem Zustandsdiagramm modelliert (siehe Abb. 7.3).



**Abbildung 7.3:** Zustandsdiagramm für Simulation des Referenzmodells

Der Zustandsautomat besteht aus drei Zuständen inklusive des Ausgangszustandes *Modell gekoppelt*. In diesem Zustand wird das Modell nicht unabhängig simuliert, sondern die Kinematik des Modells (Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position) mit dem kinematischen Zustand des SuT gekoppelt, ähnlich zu einem Shadow-Mode. Im Zustand *Modell entkoppelt* ist die Kinematik des Modells nicht mehr vom kinematischen Zustand des SuTs abhängig, sondern wird anhand des Simulationsmodells unabhängig berechnet. Im Zustand *Modellkollision* endet die Auswertung des Simulationsmodells, nachdem eine Kollision zwischen dem Modell und einem Akteur in der Szene festgestellt wurde.

Der Übergang von Zustand *Modell gekoppelt* zu *Modell entkoppelt* erfolgt, sobald das Referenzmodell ein Risiko in der Szene identifiziert, das eine Reaktion des Modells erfordert. Für das FSM entspricht dies der Verletzung der lateralen und longitudinalen Sicherheitsprüfungen (vgl. Abschnitt 4.1.3). Für das CCHD-Modell ist der Entkopplungspunkt gleichbedeutend mit dem Zeitpunkt der Risikowahrnehmung (vgl. Abschnitt 4.1.2).

Als Weiterentwicklung der Spezifikation in UN-Regelung Nr. 157 kann das System im eingeführten Evaluierungskonzept zum gekoppelten Zustand zurückkehren, wenn die Situation als unkritisch bewertet und wieder ein sicherer Zustand erreicht wird. Die Prüfung eines sicheren Zustands wird aus der

Sicht des zu bewertenden SuT durchgeführt. Wenn das SuT nach der Entkopplung des Modells durch geeignete Reaktion auf einen Verkehrskonflikt wieder einen sicheren Zustand erreicht, wird das Referenzmodell erneut mit dem SuT gekoppelt. Dieser Übergang ist notwendig, um sowohl die Vergleichbarkeit in einer ersten kritischen Situation mit vorausgehendem sicheren Zustand, als auch die Auswertung des Modells für mehrere nachfolgende kritische Situationen zu gewährleisten.

Zusammenfassend werden die Begriffe der gekoppelten und entkoppelten Modelle definiert als:

**Definition Gekoppeltes Modell:** *Ein gekoppeltes Modell weist keinen vom SuT unabhängigen kinematischen Zustand auf. Der kinematische Zustand des Referenzmodells kann als äquivalent zum kinematischen Zustand des SuT angesehen werden.*

**Definition Entkoppeltes Modell:** *Ein entkoppeltes Modell ist unabhängig vom SuT und hat einen eigenen kinematischen Zustand. Der Anfangszustand des Modells wird mit dem kinematischen Zustand des SuT zum Zeitpunkt der Entkopplung initialisiert.*

### 7.1.1.2 Erweiterung des FSM als Referenzfahrer

#### Reaktionsmodell für mehrere Akteure

Grundsätzlich ist das Evaluierungskonzept auf jedes Referenzmodell und somit auch auf das CCHD-Modell aus UN-Regelung Nr. 157 anwendbar (vgl. Abschnitt 4.1.2). Folgende Abschnitte konzentrieren sich auf das in dieser Dissertation erweiterte Modell auf Grundlage des FSM (vgl. Abschnitt 4.1.3). Um das FSM auf eine erweiterte Szenarienspezifikation im Vergleich zu [177] anzuwenden, wird ein Simulationsmodell zur Berücksichtigung mehrerer Verkehrsteilnehmer eingeführt. Das als Blockdiagramm dargestellte Reaktionsmodell zeigt, wie eine gewünschte Beschleunigung  $a_{des,n+1}$  als Reaktion auf die Akteure 1 bis  $N$  mit  $N \in \mathbb{N}$  abgeleitet wird (vgl. Abb. 7.4).

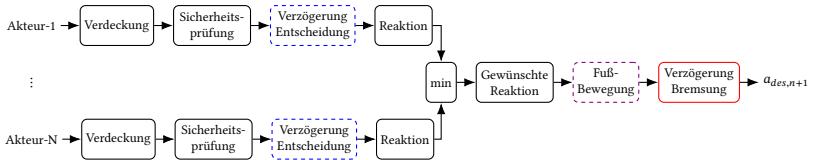


Abbildung 7.4: Simulationsmodell für mehrere Akteure mit anteiligen Reaktionszeiten (farbig)

Das Reaktionsmodell wertet die Reaktion auf das Verhalten jedes Akteurs einzeln aus und implementiert die betragsmäßig größte Bremsreaktion. Zunächst wird für jeden Akteur geprüft, ob eine Verdeckung vorliegt. Die Definition für die Verdeckung wird aus der Spezifikation des Ausscherszenarios in [177] abgeleitet, nach der die Reaktion auf den verdeckten Akteur erst beginnen darf, wenn das ausscherende Fahrzeug die Wanderzone verlassen hat (vgl. Abschnitt 3.3.6). Dieses Konzept wird zu einer verallgemeinerten Definition für das Referenzmodell angepasst.

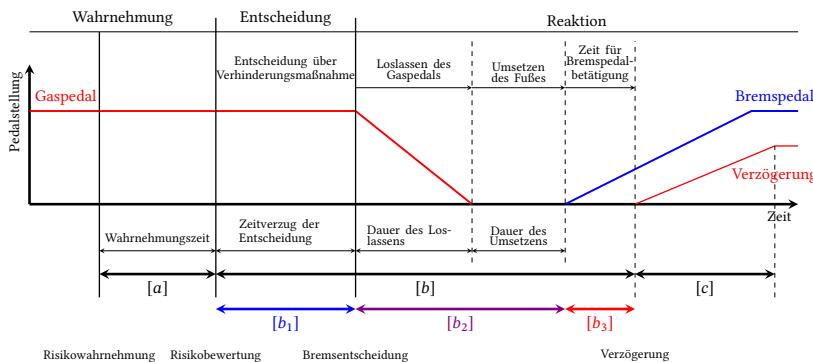
**Definition Verdeckung:** Ein Aktor gilt als verdeckt, wenn er sich in derselben Spur wie das Referenzmodell befindet und sich mindestens ein weiterer Akteur (verdeckender Akteur) in der seitlichen Wanderzone und zwischen dem verdeckten Akteur und dem Referenzmodell befindet. Auf verdeckte Akteure kann das Referenzmodell nicht reagieren.

Für alle nicht verdeckten Akteure werden die lateralen und longitudinalen Sicherheitsprüfungen des FSM durchgeführt. Mit Hilfe der Fuzzy-SSM wird die Reaktion auf den Akteur berechnet (vgl. Gleichung (4.16)). Aus den einzelnen Reaktionen auf alle Akteure wird die minimale Beschleunigung, bzw. maximale Bremsbeschleunigung als Soll-Reaktion ausgewählt. Die implementierte Beschleunigung des nächsten Zeitschritts  $a_{imp,n+1}$  wird durch Begrenzung der Änderung von  $a_{imp}$  durch den maximalen Ruck  $j_{max}$  abgeleitet wird. Die numerische Differentialgleichung lautet:

$$a_{imp,n+1} = \min(a_{imp,n} - j_{max} \cdot dt, a_{des,n+1}), \quad (7.1)$$

$dt$  bezeichnet die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Simulationsschritten. Die restlichen kinematischen Zustände Geschwindigkeit  $v$  und Position  $s$  des Modells werden durch Integration von  $a_{imp}$  berechnet.

Für die Modellierung der menschlichen Reaktionszeit wird als Teil des Simulationsmodells in Abb. 7.4 die Definition des CCHD-Reaktionsmodells verwendet. Das CCHD-Reaktionsmodell (vgl. Abb. 4.4) unterscheidet drei Phasen der menschlichen Reaktion vom Eintreten einer kritischen Situation bis zum Erreichen der maximalen Bremsverzögerung. Die Dauer der Phasen gibt die Wahrnehmungszeit  $a$ , die Reaktionszeit  $b$  und die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Verzögerung  $c$  an (vgl. Abschnitt 4.1.2). Die Reaktionszeit wird weiter in drei Abschnitte unterteilt. Während des Zeitverzugs der Entscheidung  $b_1$  entscheidet der Fahrer, wie er auf den Verkehrskonflikt reagiert. Die Fußumsetzzeit  $b_2$  ist die Dauer, während der das Gaspedal losgelassen und der Fuß auf das Bremspedal gesetzt wird. Die Zeit zur Bremspedalbetätigung  $b_3$  gibt die Dauer der Verzögerung des Bremssystems des Fahrzeugs zwischen dem Betätigen des Bremspedals und dem Abbremsen des Fahrzeugs an.



**Abbildung 7.5:** CCHD-Reaktionsmodell aus Abb. 4.4 erweitert um geteilte Reaktionszeiten  $b_1$ ,  $b_2$  und  $b_3$

Die aufgeteilte Reaktionszeit wird im Simulationsmodell in Form von drei Zeitverzögerungen (farbige Blöcke in Abb. 7.4) eingeführt. Obwohl das FSM die Definition der Reaktionszeit des CCHD-Modells nicht explizit verwendet,

werden im FSM die gleichen Parameterwerte übernommen. Daher werden die drei Verzögerungen in verschiedenen Phasen des Simulationsmodells implementiert (vgl. Abb. 7.4). Die Entscheidungsverzögerung  $b_1$  wird jedes Mal einzeln für die Akteure hinzugefügt, wenn ein Akteur durch das Modell neu als Risiko eingestuft wird. Wenn ein Akteur nicht mehr als Risiko eingestuft wird, wird diese Entscheidungsverzögerung für diesen Akteur zurückgesetzt. Die Grundidee dieses Konzepts lässt sich anhand eines einfachen Beispiels wie folgt veranschaulichen.

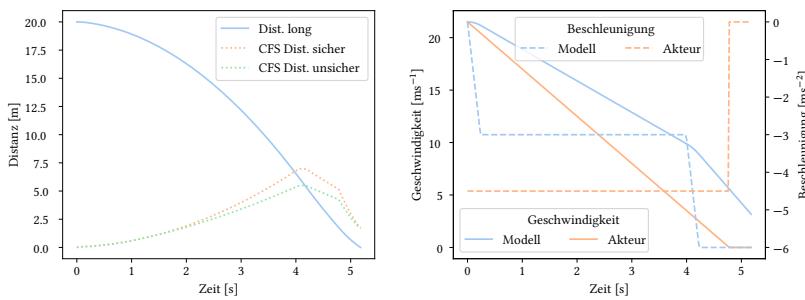
Tritt während der Reaktion in einer kritischen Verkehrssituation ein zweites Risiko aufgrund eines zusätzlichen Verkehrsteilnehmers auf, muss ein Fahrer zunächst das neue Risiko erkennen und eine Entscheidung darüber treffen, wie er auf die neu entstandene Situation reagiert. Erst nach der Entscheidungsverzögerung  $b_1$  wird also eine Reaktion auf das neu entstandene Risiko erfolgen. Daher wird die Verzögerung bei jedem neu wahrgenommenen Risiko angewendet. Die Fußumsetzzeit  $b_2$  wird hingegen nur einmal hinzugefügt, wenn die erste Reaktion erforderlich ist. Nachfolgende unabhängige Reaktionen erfordern keine Fußumsetzzeit mehr, da der Fahrer seinen Fuß bereits vom Gaspedal zum Bremspedal umgesetzt hat und erneut bremsen kann. Als Letztes wird die aus der Kinematik des Fahrzeugs resultierende verzögert eintretende Bremsbeschleunigung bei jeder Bremsung hinzugefügt und als Totzeit-Element  $b_3$  modelliert.

### **Erweiterung der CFS Metrik**

In Abschnitt 4.1 wird die vereinfachte Modellierung der drei Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [177] betrachtet, die nicht den Szenarienkatalog eines SAE-Level 4 Fahrzeugs abdeckt und zukünftig erweitert werden muss [193]. Im Rahmen dieser Dissertation wird die Limitierung von [177] betrachtet, nach der für andere Verkehrsteilnehmer im Einscherszenario eine dauerhaft konstante Geschwindigkeit ohne gleichzeitige Abbremsung angenommen wird. Wie in Abschnitt 4.1.4 beim Vergleich der regulatorischen Modelle gezeigt wurde, weist das Einscherszenario den höchsten Anteil an Kollisionen auf und ist daher von besonderem Interesse für eine detailliertere Berücksichtigung des Akteurverhaltens sowie zur Verbesserung des FSM. Da eine gleichzeitige Abbremsung insbesondere in der CFS-Metrik des FSM

nicht berücksichtigt wird, kann es in Szenarien zu Kollisionen kommen, in denen ein menschlicher Fahrer die gleichzeitige Abbremsung antizipieren und eine Kollision potenziell verhindern könnte. Tritt eine Verzögerung eines Akteurs nach oder während eines Einschervorgangs auf, kann eine über die Komfortverzögerung hinausgehende Abbremsung durch das Modell notwendig sein, um eine Kollision zu vermeiden, da der Ausgangsabstand geringer ist als der von der PFS-Metrik berechnete Sicherheitsabstand.

Ein konkretes Beispiel für dieses Verhalten zeigt Abb. 7.6.



(a) Längsabstand zwischen Modell und Akteur   (b) Längsgeschwindigkeit und Beschleunigung

**Abbildung 7.6:** Beispiel einer Modellreaktion auf ein einscherendes Fahrzeug, das gleichzeitig mit  $4.5 \text{ m s}^{-2}$  abremst

Bei einem Einschervorgang 20 m vor dem Modell bremst das einscherende Fahrzeug mit  $4.5 \text{ m s}^{-2}$  ab. Beide Fahrzeuge fahren initial mit einer Geschwindigkeit von  $20 \text{ m s}^{-1}$  auf benachbarten Fahrspuren. Das FSM ist nach [177] mit einer Komfortverzögerung von  $3 \text{ m s}^{-2}$  und einer Maximalverzögerung von  $6 \text{ m s}^{-2}$  parametrisiert, sodass die Verzögerung des einscherenden Fahrzeugs innerhalb der Verzögerungsgrenzen des Modells liegt. Da die CFS-Metrik von der zunächst geringen Geschwindigkeitsdifferenz abhängt, reagiert das Modell mit der Komfortverzögerung von  $3 \text{ m s}^{-2}$  (vgl. Abb. 7.6b). Nach  $\approx 4 \text{ s}$  fällt die relative longitudinale Distanz unter den Sicherheitsabstand der CFS-Metrik (vgl. Abb. 7.6a) und die Modellreaktion wird auf die maximale Verzögerung erhöht. Die Reaktion erfolgt jedoch aufgrund der Vernachlässigung der

gleichzeitigen Beschleunigung nicht rechtzeitig, um die Kollision zu vermeiden, die nach  $\approx 5.2$  s mit einer Relativgeschwindigkeit von  $3.17 \text{ m s}^{-1}$  stattfindet. Die Reaktionszeit des Modells wurde für das Beispiel vernachlässigt, würde jedoch zu einer weiteren Verschärfung des Szenarios führen.

Daher wird eine Änderung der CFS-Metrik vorgeschlagen, bei der die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit des Akteurs in Gleichung (4.8) durch die Annahme einer konstanten Beschleunigung  $a'_{actor}$  ersetzt wird. Die longitudinale Geschwindigkeit des Akteurs nach der Reaktionszeit  $\tau$  ist  $u_{actor,lon,NEXT}$ , und die Abstandsänderung während dieser Zeit  $d_{new}$ :

$$d_{new} = \left( \frac{u_{ego,lon} + u_{ego,lon,NEXT}}{2} - \frac{u_{actor,lon} + u_{actor,lon,NEXT}}{2} \right) \cdot \tau \quad (7.2)$$

Die Beschleunigung des Akteurs wird auf negative Werte begrenzt, um eine Unterschätzung der Kritikalität des Akteursverhaltens aufgrund positiver Beschleunigungswerte zu verhindern.

$$a'_{actor} = \min(a_{actor,lon}, 0) \quad (7.3)$$

$$u_{actor,lon,NEXT} = u_{actor,lon} + a'_{actor} \cdot \tau \quad (7.4)$$

Für die Berechnung des sicheren und unsicheren Abstands wird die gleiche Fallunterscheidung getroffen wie in Gleichung (4.9) und Gleichung (4.10) nach [177]. Für  $u_{ego,lon,NEXT} < u_{actor,lon,NEXT}$  sind der sichere und unsichere Abstand identisch definiert wie die Änderung des Abstands unter Verwendung der aktuellen Verzögerung des Modells.

$$d_{safe} = d_{unsafe} = \frac{(u_{ego,lon,NEXT} - u_{actor,lon,NEXT})^2}{2(a'_{actor} - a'_{ego})} \quad (7.5)$$

Gilt  $u_{ego,lon,NEXT} \geq u_{actor,lon,NEXT}$ , kann der Fall auftreten, dass der Akteur vor dem Modell zum Stillstand kommt. Dafür wird festgelegt, dass ein Akteur nach Erreichen des Stillstands stationär bleibt, und nicht beginnt rückwärts

zu fahren. Für den sicheren Abstand folgt:

$$d_{safe} = \begin{cases} d_{new} + \frac{(u_{ego,lon,NEXT} - u_{actor,lon,NEXT})^2}{2(b_{comf} + a'_{actor})}, & -a'_{actor} < b_{comf} \\ d_{new} + \frac{u_{ego,lon,NEXT}^2}{2b_{comf}} + \frac{u_{actor,lon,NEXT}^2}{2a'_{actor}}, & -a'_{actor} > b_{comf} \end{cases}, \quad (7.6)$$

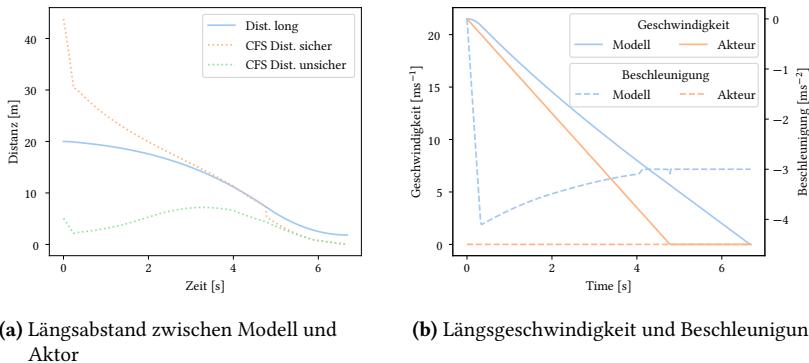
Im ersten Fall ist die Verzögerung  $-a'_{actor}$  des Akteurs geringer als die Komfortverzögerung  $b_{comf}$  des Modells. Der Sicherheitsabstand ist die erforderliche Strecke, um die Geschwindigkeit des Modells mit der Komfortverzögerung  $b_{comf}$  an den Akteur anzulegen. Wenn die Verzögerung des Akteurs im zweiten Fall die Komfortverzögerung übersteigt, wird die Differenz des Bremswegs von Modell und Akteur verwendet. Analog wird der unsichere Abstand definiert:

$$d_{unsafe} = \begin{cases} d_{new} + \frac{(u_{ego,lon,NEXT} - u_{actor,lon,NEXT})^2}{2(b_{max} + a'_{actor})}, & -a'_{actor} < b_{max} \wedge \frac{u_{ego,lon,NEXT}}{b_{max}} < \frac{u_{actor,lon,NEXT}}{-a'_{actor}} \\ d_{new} + \frac{u_{ego,lon,NEXT}^2}{2b_{max}} + \frac{u_{actor,lon,NEXT}^2}{2a'_{actor}}, & \text{sonst} \end{cases}, \quad (7.7)$$

Unterschieden wird der Fall, bei dem der Akteur eine geringere Verzögerung  $-a'_{actor}$  als die maximale Verzögerung  $b_{max}$  des Modells aufweist und daher der Akteur den Stillstand erst nach dem Modell erreicht. In diesem Fall wird die erforderliche Strecke zugrunde gelegt, um die Geschwindigkeit  $u_{ego,lon,NEXT}$  des Modells bei maximaler Verzögerung an die Geschwindigkeit  $u_{actor,lon,NEXT}$  des Akteurs anzupassen. Alternativ dazu wird die Differenz der Bremswege von Akteur und Modell unter Verwendung der maximalen Verzögerung  $b_{max}$  für das Modell genutzt.

Für das zuvor betrachtete Beispilszenario ist das Modell mit den vorgeschlagenen Anpassungen der CFS in der Lage, eine Kollision durch Berücksichtigung der Beschleunigung des einscherenden Fahrzeugs zu vermeiden (vgl.

Abb. 7.7a). Dafür ist außerdem eine geringere maximale Verzögerung von  $4 \text{ m s}^{-2}$  (vgl. Abb. 7.7b) im Vergleich zu  $6 \text{ m s}^{-2}$  (vgl. Abb. 7.6b) ausreichend.



(a) Längsabstand zwischen Modell und Akteur

(b) Längsgeschwindigkeit und Beschleunigung

**Abbildung 7.7:** Beispiel für die Reaktion eines Modells mit der angepassten CFS-Metrik auf ein einscherendes Fahrzeug, das mit  $4.5 \text{ m s}^{-2}$  abbremst

Ausgehend von Gleichung (7.2) gilt unabhängig von der Beschleunigung des Akteurs, dass die neu berechneten Sicherheitsabstände  $d_{safe}$  und  $d_{unsafe}$  stets größer oder gleich den Sicherheitsabständen ohne die Anpassung sind. Somit ist der Wert der CFS immer größer oder gleich der ursprünglichen Berechnung in [177]. Damit führt die eingeführte Anpassung der CFS-Metrik zu einem stets sichereren Verhalten des Modells bei der Betrachtung von Einscherszenarien mit höherer Modellierungstiefe durch die zusätzliche Berücksichtigung von Beschleunigungen während des Einschervorgangs.

### Einführung eines lateralen TTC-Schwellenwertes

Ein weiteres Ziel dieser Dissertation bei der Erweiterung des FSM ist die Verringerung der Anzahl falsch positiver Modellreaktionen bei der Anwendung auf unkritische Szenarien. Wie von [183] diskutiert wurde, weist das FSM eine hohe Sensitivität auf, woraus eine hohe Aktivierungsrate bei der Anwendung auf reale Daten folgt. Aus der Anwendung des FSM auf Beinahe-Unfälle und der hohen beobachteten Falsch-Positiv-Rate des Modells folgern Olleja et al. [194] ein „übergärtiges“ Verhalten des Referenzmodells. Da realistische Testszenarien darauf abzielen, das Verhalten anderer Akteure in der

realen Welt so gut wie möglich zu repräsentieren, bedeutet dies auch, dass eine Anwendung des Modells in solchen Szenarien ebenfalls anfällig für falsch positive Reaktionen ist. Entscheidend für die hohe Sensitivität des Modells ist die laterale Sicherheitsprüfung in Gleichung (4.14), die lediglich die laterale und longitudinale TTC des SuT gegenüber einem Akteur vergleicht. Da die longitudinale TTC beliebig hohe Werte für beliebig kleine, aber positive Werte der longitudinalen Differenzgeschwindigkeit annimmt, kann ein beliebig hoher lateraler TTC-Wert ausreichen, um die laterale Sicherheitsprüfung zu verletzen. Dies tritt bereits für beliebig kleine, aber positive laterale Geschwindigkeiten des Akteurs in Richtung des SuT auf und führt zu der hohen Anzahl an Reaktionen des Modells im Einscherszenario, selbst wenn nur eine geringfügige Querbewegung benachbarter Fahrzeuge vorliegt.

Zur Reduzierung der Falsch-Positiv-Rate des Modells wird ein Schwellenwert für die laterale TTC-Komponente vorgeschlagen.  $TTC_{th}$  ist der Schwellenwert, den die seitliche TTC unterschreiten muss, um als Risiko eingestuft zu werden. Die laterale Sicherheitsprüfung aus Gleichung (4.14) wird daher um die folgende Bedingung erweitert:

$$\frac{d_{lat}}{u_{actor,lat}} < TTC_{th} \quad (7.8)$$

Die eingeführte Grenze kann als seitlicher Abstand  $d_{lat} = TTC_{th} \cdot u_{actor,lat}$  interpretiert werden, den ein Akteur unterschreiten muss, bevor er als Risiko eingestuft wird. Unter der in [177] getroffenen Annahme konstanter lateraler Geschwindigkeit kann eine Kollision zwischen Modell und Akteur frühestens nach der Zeit  $TTC_{th}$  nach Unterschreiten des Schwellenwertes erfolgen.

Außerdem weist ein automatisiertes Fahrzeug bereits einen durch Systemparameter definierten Schwellenwert auf, der aus der Detektionsgenauigkeit der lateralen Geschwindigkeit eines Fahrzeugs auf der benachbarten Spur resultiert. Für einen seitlichen Abstand von 1.5 m und einer beispielhaften Genauigkeit bei der Messung der lateralen Geschwindigkeit eines benachbarten Fahrzeugs von  $0.1 \text{ m s}^{-1}$  ergibt sich ein oberer Grenzwert  $TTC_{th} = 15 \text{ s}$ . Daher beeinflussen die Systemeigenschaften bereits den Bereich der seitlichen

TTC, sodass ein definierter Schwellenwert im Modell zur Klarstellung dieser Grenze beitragen kann.

Basierend auf der Auswertung des HighD-Datensatzes in [226] werden zwei Schwellenwerte vorgeschlagen. Erstens wird der TTC-Wert beim Maximum des  $F_1$ -Scores ausgewählt, der das harmonische Mittel von Genauigkeit (engl. Precision) und Sensitivität (engl. Recall) abbildet. Zweitens wird ein konservativer Schwellenwert verwendet, der auf einer Sensitivität von 95% basiert. Die Werte von  $TTC_{th}$  finden sich in Tabelle 7.1.

**Tabelle 7.1:** Werte für den TTC-Schwellenwert aus [226]

$TTC_{th,F_1}$	8.5 s
$TTC_{th,95^{th}Rec.}$	11 s

Um diese Werte ins Verhältnis zu setzen, entsprechen die  $TTC_{th}$ -Schwellenwerte bei einem seitlichen Abstand von 1.5 m zwischen Ego und einscherendem Fahrzeug einer lateralen Relativgeschwindigkeit von  $0.18 \text{ m s}^{-1}$  bzw.  $0.14 \text{ m s}^{-1}$ .

### 7.1.2 Definition Akzeptanzkriterium im Vergleich zum Referenzfahrer aus UN-Regelung Nr. 157

Um das erweiterte Modell in die Sicherheitsargumentation des SuT einzubinden, muss im nächsten Schritt ein konkretes Akzeptanzkriterium relativ zum Referenzmodell definiert werden. Im Rahmen dieses Anwendungsfalls wird als Akzeptanzkriterium (vgl. Nachweis S7.1.2 in Abb. 7.2) festgelegt, dass die Performance des SuT bezogen auf die Unfallvermeidung in kritischen Szenarien mindestens gleich oder besser im Vergleich zum FSM aus UN Regelung Nr. 157 inklusive der in Abschnitt 7.1.1.2 eingeführten Erweiterungen sein soll. Für den Vergleich werden sowohl die drei in [177] definierten Szenarien (vgl. Abschnitt 4.1) als auch das der eingeführten Erweiterung der CFS-Metrik zugrunde liegende kombinierte Einscher- und Bremsszenario verwendet.

## Modellparameter

Hierfür muss die Parametrisierung des Simulationsmodells festgelegt werden. Wie in Abschnitt 4.1.2 eingeführt würde, gilt UN-Regelung Nr. 157 in der aktuellen Erweiterung [177] sowohl für PKW als auch LKW, wobei keine Unterscheidung der Parameter der definierten Referenzmodelle vorgenommen wird. Im Gegensatz dazu gelten bei der Typgenehmigung von AEB-Systemen in UN-Regelung Nr. 152 [181] (Fahrzeugklassen M1, N1) und Nr. 131 [204] (Fahrzeugklassen M2, M3, N2, N3) unterschiedliche zulässige Kollisionsgeschwindigkeiten bei Notbremsmanövern je nach Fahrzeugklasse. Unterschiede existieren sowohl zwischen den Kategorien M (Personentransport) und N (Güterbeförderung), als auch zwischen den jeweiligen Gewichtsklassen (z. B. Klasse N3 > 12 t für in dieser Dissertation betrachtete Nutzfahrzeuge). Für die Entwicklung der Referenzmodelle in [180] und [183] standen PKW im Fokus für die Modellierung des Fahrverhaltens. Für die zukünftige Überarbeitung von UN-Regelung Nr. 157 und neuen Regelungen für Systeme mit SAE-Level 4 besteht daher weiterer Forschungsbedarf, um die Auswirkungen unterschiedlicher Fahrzeugdynamik von PKW und LKW in den Referenzmodellen zu berücksichtigen und mit geltenden Regelungen für AEB-Systeme zu harmonisieren. Da zum aktuellen Zeitpunkt die geltende Verordnung einen festen Satz von Modellparametern festlegt, werden an dieser Stelle trotz möglicher Unterschiede zwischen PKW und LKW die selben Parameter bei der Implementierung des erweiterten Simulationsmodells verwendet.

Alle Parameter sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

**Tabelle 7.2:** Parameter des FSM nach UN-Regelung Nr. 157 [177]

Parameter	Wert	Beschreibung
$b_{ego,comf}$	$4 \text{ m s}^{-2}$	Komfortverzögerung des Modells
$b_{ego,max}$	$6 \text{ m s}^{-2}$	Maximale Verzögerung des Modells
$j_{max}$	$12.65 \text{ m s}^{-2}$	Maximaler Ruck in Längsrichtung bei Reibungskoeffizienten der Straße von 1
$b_{actor,max}$	$7 \text{ m s}^{-2}$	Maximale Abbremsung des Akteurs
$\tau$	0.75 s	Gesamtreaktionszeit des Modells
$d_1$	2 m	Sicherheitsabstand beim Stillstand der Fahrzeuge
$s_1$	0.1 s	Zusätzlicher zeitlicher Sicherheitsabstand

### Aufteilung Reaktionszeit

Mit der eingeführten Aufteilung der Reaktionszeit  $\tau$  in die drei Komponenten des Reaktionsmodells  $b_1$ ,  $b_2$  und  $b_3$  (vgl. Abschnitt 7.1.1) müssen die drei Reaktionszeiten definiert werden. Um der Gesamtreaktionsdauer aus [177] zu entsprechen, gilt die Bedingung (vgl. Abb. 7.5):

$$\tau = b_1 + b_2 + b_3 \quad (7.9)$$

Aus dem Experiment, das zur Definition des Reaktionsmodells verwendet wurde, konnte nur die Dauer des Umsetzens des Fußes zum Bremspedal als ein Anteil von  $b_2$  abgeleitet werden [205]. Der Aufbau des Experiments erlaubt nicht die Ableitung unterschiedlicher Reaktionszeiten. Andere Studien zur Reaktionszeit menschlicher Fahrer verwenden einen abweichenden Versuchsaufbau zur Bestimmung von Beginn und Ende einer Reaktion, der mit dem Reaktionsmodell nicht vereinbar ist [108], [163]. Zur genaueren Aufteilung der Reaktionszeit sind zukünftig weitere Untersuchungen als Erweiterung der in [180] durchgeföhrten Fahrversuche notwendig. Daher wird eine gleichmäßige Aufteilung der Reaktionszeiten als Ausgangspunkt für eine prototypische Implementierung des erweiterten Referenzmodells vorgeschlagen:

$$b_1 = b_2 = b_3 = \frac{\tau}{3} = 0.25 \text{ s} \quad (7.10)$$

## 7.2 Szenarienbasierte Datenauswahl

Als zweiter Schritt des in Kapitel 5 eingeführten Prozesses erfolgt die Auswahl von kritischen Realdaten für die Einbindung in die Freigabeargumentation. Dabei fokussiert sich der Anwendungsfall auf die Beantwortung von Forschungsfrage 2, bezogen auf die Sammlung von kritischen Realdaten und deren Integration in den szenarienbasierten Testprozess.

Abb. 7.8 zeigt den aus Prozessschritt 2 (vgl. Abschnitt 5.1.2) resultierenden Teil der GSN in Abb. 7.1, der in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

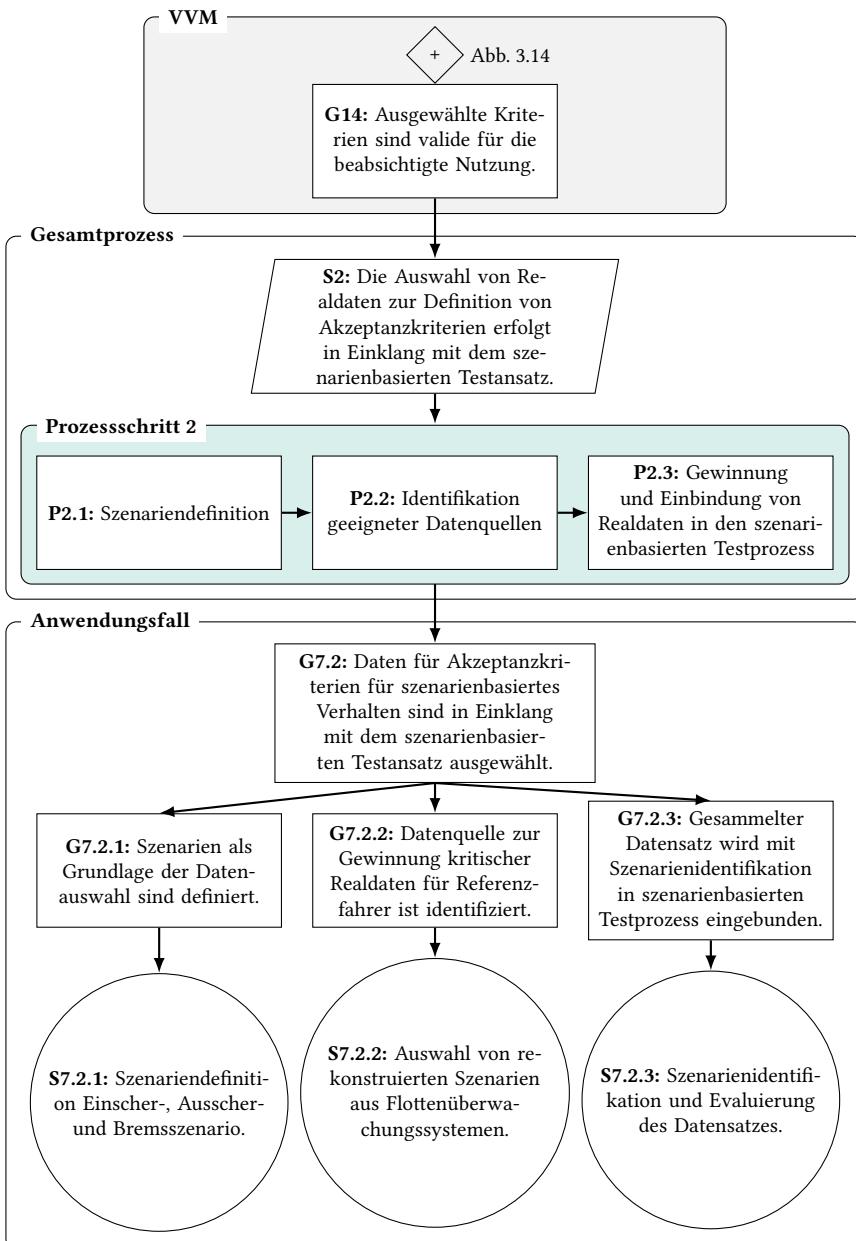


Abbildung 7.8: Ergebnis GSN Prozessschritt 2 (vgl. Abb. 7.1)

### 7.2.1 Szenariendefinition

Als Auswahlkriterien der Realdaten werden zuerst das SuT und die ODD definiert. Analog zu Abschnitt 6.2 wird als SuT die Verhaltens- und Planungssoftware hochautomatisierter LKW (SAE-Level 4 [5]) der Klasse 8 (zulässiges Gesamtgewicht >33.001 lbs) betrachtet, die für den Warentransport zwischen Logistikzentren eingesetzt werden. Für dieses Anwendungsbeispiel wurde die ODD auf das Fahren auf Autobahnen (S1100) oder Auf- und Abfahrten (S1630) in den USA [206] in der südwestlichen Region der USA eingeschränkt.

Ziel der Datenauswahl ist die Sammlung von kritischen Szenarien mit und ohne Unfallfolgen (vgl. Abschnitt 3.3.2), in denen die Unfallvermeidung des SuT getestet und das zuvor definierte Referenzmodell angewendet werden kann. Dabei werden nur Szenarien mit mindestens einem anderen Verkehrsteilnehmer berücksichtigt, was auch für die betrachteten ALKS-Szenarien gilt. Als Szenarien werden die in Abschnitt 4.1 eingeführten Einscher-, Ausscher- und Bremsszenarien betrachtet.

### 7.2.2 Identifikation geeigneter Datenquellen für kritische Realdaten

Die Gegenüberstellung und Diskussion verschiedener Datenquellen für Szenarien in Abschnitt 3.3.2 zeigt, dass keine der Quellen eine gleichzeitige Erfüllung aller Kriterien für kritische Daten aufweist. Den vielversprechendsten Ansatz stellen kommerzielle Flottenüberwachungssysteme, basierend auf Dashcams und integrierter Sensorik dar, die insbesondere von Logistikunternehmen im Nutzfahrzeughbereich verbreitet eingesetzt werden. Im Nutzfahrzeughbereich legen die Fahrzeuge der mit den Systemen ausgestatteten Flotten, je nach Anbieter der Flottenüberwachungssysteme, mehrere Milliarden Kilometer pro Jahr zurück. Einen Vergleich verschiedener kommerzieller Anbieter zeigt [207].

Damit besteht ein großes Potenzial, diese Datenquelle für die Sammlung von kritischen Szenarien zu erschließen. Aufgrund der hohen Laufleistung der

Flotten können unbekannte Szenarien innerhalb der ODD identifiziert werden, die mit den limitierten Datenmengen der zuvor diskutierten Datenquellen statistisch nicht beobachtbar sind.

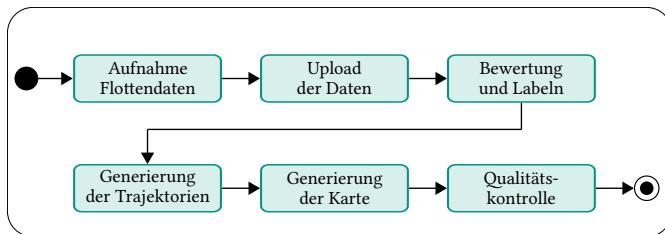
Daher wurden im Rahmen der Dissertation Dashcam-Aufnahmen als Datenquelle identifiziert und ein Datensatz aus kritischen Szenarien erstellt. Hierzu wurden kritische Szenarien aus kommerziell eingesetzten Videoüberwachungssystemen mit Dashcams von Nutzfahrzeug-Flotten extrahiert. Die einzelnen Schritte werden im folgenden Abschnitt erläutert.

### **7.2.3 Gewinnung und Einbindung von kritischen Realdaten in den szenarienbasierten Testprozess**

#### **7.2.3.1 Generierung von ausführbaren Szenarien aus kritischen Realdaten**

Ausgehend von der ausgewählten Datenquelle aus Flottenüberwachungssystemen erfolgt im nächsten Schritt die Überführung der aufgezeichneten kritischen Realdaten in ein ausführbares Simulationsszenario (vgl. Abb. 3.10). Zur Ausführung in einer XIL-Umgebung wird die Beschreibung der Verkehrsteilnehmer in Form einer Objektliste sowie der Umgebung in einer Karte benötigt.

Für den in dieser Dissertation verwendeten Datensatz aus Dashcam-Aufnahmen wird ein teilautomatisierter Prozess zur Generierung von ausführbaren Szenarien verwendet, der zukünftig durch weitere Automatisierung basierend auf den in Abschnitt 3.3.3 diskutierten Ansätzen optimiert werden kann. Im ersten Schritt erfolgt die Extraktion von Informationen aus den aufgezeichneten kritischen Realdaten (vgl. Abb. 7.9), bevor im nächsten Schritt in einer XIL-Umgebung ausführbare Szenarien generiert werden (vgl. Abb. 7.10).



**Abbildung 7.9:** Extraktion von Informationen aus kritischen Realdaten von Dashcam-Systemen zur Flottenüberwachung

Basierend auf der Infrastruktur des Anbieters des kommerziellen Flottenüberwachungssystems werden Aufnahmen von Events von den Flottenfahrzeugen zur Weiterverarbeitung in ein Backend hochgeladen. Hier erfolgt, basierend auf den aufgezeichneten Videos und Messdaten, eine manuelle oder teilautomatisierte Klassifizierung der Events nach z. B. Fahrzeugart, Unfallbeteiligten und Unfallhergang. Die vergebene Kategorisierung ist dabei vergleichbar mit der in SHRP2 verwendeten Einteilung von Unfallkategorien sowie unerwarteten Situationen, die dem kritischen Event vorangingen. Die Daten werden an dieser Stelle den Kunden bereitgestellt, die basierend auf den Videoaufnahmen, Sensorsignalen und Metadaten eine eigene Bewertung der Events vornehmen. Daraus werden Maßnahmen zur Fahrerschulung abgeleitet, eine erste Einschätzung des Reparaturaufwands bei einem Unfall durchgeführt sowie die Daten als rechtlicher Nachweis im Falle von Unfällen verwendet.

Wenn aufgezeichnete Events in Szenarien überführt werden sollen, erfolgt die Generierung der Trajektorien der Verkehrsteilnehmer. Durch die direkte Verfügbarkeit kinematischer Messgrößen des Fahrzeugs wird das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten des Ego-Fahrzeugs bestimmt. Die Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer wird aus den Videodaten sowie, je nach Verfügbarkeit, durch Messgrößen von Fahrerassistenzsystemen rekonstruiert. Basierend auf den gesammelten GPS-Daten wird der Ort des Events verfügbaren Kartendaten zugeordnet und eine Karte erstellt, die das Straßennetz zum Aufzeichnungszeitraum widerspiegelt. In der Karte werden außerdem relevante Informationen wie das Geschwindigkeitslimit den Straßenabschnitten zugeordnet. Abschließend erfolgt eine visuelle Prüfung

der Übereinstimmung zwischen den Aufnahmen und den rekonstruierten Szenarien (vgl. Qualitätskontrolle in Abb. 7.9). Während diese Kontrolle die Qualität der rekonstruierten Szenarien sicherstellt, können zukünftig neue Methoden zur Informationsextraktion basierend auf maschinellen Lernverfahren in den Prozess eingebunden werden (Abschnitt 3.3.3). Dadurch kann die Automatisierung der Szenarienkonstruktion erhöht sowie der Zeitaufwand und die Kosten reduziert werden.

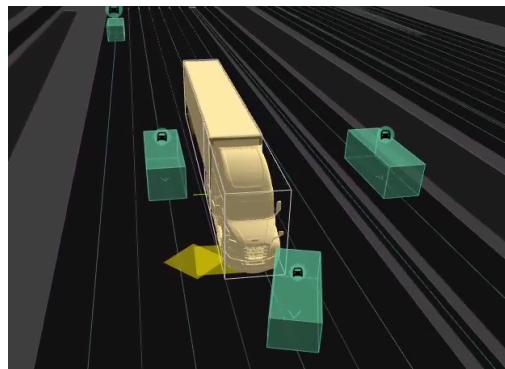
Ausgehend von den extrahierten Trajektorien und Karteninformationen erfolgt im nächsten Schritt die Generierung des ausführbaren Szenarios. Für die Einbindung der Daten in eine SiL-Umgebung wurde im Rahmen der Dissertation ein vollständig automatisierter Prozess umgesetzt, der die Daten des Anbieters des Flottenüberwachungssystems einliest und ausführbare Szenarien erzeugt (vgl. Abb. 7.10).



**Abbildung 7.10:** Schritte zur Generierung eines ausführbaren Szenarios

Im ersten Schritt werden die als Textdatei vorliegenden Trajektorien zu Objektlisten transformiert. Anschließend wird die Karte konvertiert und der Simulationsumgebung sowie dem SuT zur Verfügung gestellt. Dabei wird verifiziert, ob in der Karte alle notwendigen Informationen enthalten sind und der semantische Aufbau korrekt ist. Im letzten Schritt wird unter Verwendung der Szenariensprache der Simulationsumgebung das ausführbare Szenario erstellt. Mit der umgesetzten Szenarienmodellierung ist es möglich, durch einen Parameter in der Szenarienbeschreibung für das Ego-Fahrzeug entweder das rekonstruierte Szenario des menschlichen Fahrers abzuspielen oder die Führung des Ego-Fahrzeugs durch das SuT ausführen zu lassen. Die restlichen Akteure aus dem rekonstruierten Szenario werden als Open-Loop-Simulation abgespielt. Somit entsteht ein ausführbares Szenario, das zur Bewertung des SuT im Rahmen des szenarienbasierten Testprozesses eingesetzt wird.

Ein Beispiel für ein rekonstruiertes Szenario zeigt Abb. 7.11. Bei dem dargestellten Szenario schert ein langsameres Fahrzeug aufgrund unzureichender Beobachtung der Umgebung direkt vor dem Ego-Fahrzeug ein, was zu einer Kollision zwischen beiden Fahrzeugen führt.



**Abbildung 7.11:** Szene aus einem rekonstruierten kritischen Einscherer-Szenario mit Unfallfolge in der Simulationsumgebung Log Sim

### 7.2.3.2 Software-in-the-Loop-Umgebung

Für die Realisierung der Simulation der kritischen Szenarien wird eine SiL-Umgebung eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.1.3). Verwendet wird die Simulationsumgebung Log Sim des Unternehmens Applied Intuition<sup>1</sup>.

Als SuT wird ein beispielhaftes SAE-Level 4 System für das Anwendungsbeispiel innerhalb der SiL-Umgebung verwendet (vgl. Abb. 7.12). Zur Demonstration des Prozesses wird die maximale Bremsbeschleunigung des beispielhaften SuT auf  $b_{SuT,max} = 3 \text{ m s}^{-2}$  limitiert.

---

<sup>1</sup> <https://www.appliedintuition.com/products/log-sim>

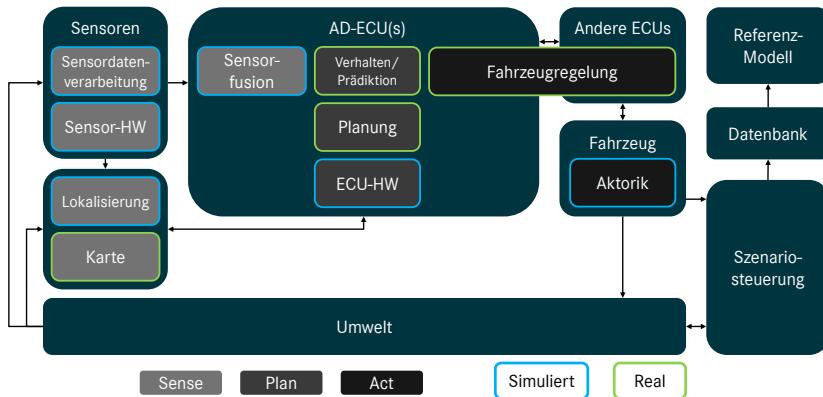


Abbildung 7.12: Verwendete SiL-Umgebung (vgl. Abb. 3.1)

Das SuT beinhaltet die Verhaltens- und Planungskomponenten des Gesamt-systems sowie die Fahrzeugregelung. Die Sensorik und Sensorfusion wird über Sensormodelle simuliert, deren Ergebnis als Objektliste an die Planungs-komponenten (Verhalten/Prädiktion und Planung) übergeben wird. Als Midd-leware für die Kommunikation zwischen den Komponenten wird ROS einge-setzt<sup>1</sup>. Die von der Fahrzeugregelung berechneten Fahrbefehle werden von der Fahrzeug-Aktorik, die durch ein Fahrdynamikmodell simuliert wird, in die Bewegung des Fahrzeugs innerhalb der Umwelt umgesetzt. Auch die ECU-Hardware ist simuliert, daher handelt es sich um eine SiL-Umgebung. Im Rah-men der Closed-Loop-Simulation können andere Akto-ren auf die Bewegung und Position des SuT reagieren. Nach einer durchgeführten Simulation wer-den die Trajektorien von Akteuren und SuT in eine Datenbank gespeichert. Auf der Grundlage der gespeicherten Daten werden Nachbearbeitungsschritte durchgeführt, wie z.B. die Überprüfung von Systemanforderungen oder die Berechnung von Kritikalitätsmetriken.

Das in Abschnitt 7.1 definierte Evaluierungskonzept ist als Nachbearbei-tungsschritt implementiert und wird nach Durchführung einer Simulation ausgewertet. Da das Verhalten der Akteure bereits aus der durchgeführten

<sup>1</sup> <https://www.ros.org>

Simulation bekannt ist, wird das Modell als Open-Loop-Simulation aus den in der Datenbank gespeicherten Trajektorien berechnet (vgl. Referenzmodell in Abb. 7.12). Wie in Abschnitt 7.1.1 diskutiert wurde, trägt die anfängliche Kopplung des Modells zum SuT sowie die Möglichkeit der erneuten Kopplung in unkritischen Situationen zur Maximierung der Vergleichbarkeit zwischen SuT- und Modellverhalten bei. Die Open-Loop-Simulation des Referenzmodells auf den Simulationsdaten bietet einen erheblich geringeren Rechenaufwand im Vergleich zu einer erneuten Closed-Loop-Simulation. Außerdem existieren bereits verschiedene Ansätze wie das Reactive Replay [16] und eine Methode zur Anpassung von rekonstruierten Szenarien bei abweichendem SuT-Verhalten [127], mit denen das vorgestellte Evaluierungskonzept zukünftig erweitert werden kann.

Für die mit dem SuT durchgeführte Closed-Loop-Simulation wird die Simulation im Falle einer Kollision beendet, und Kritikalitätsmetriken für den Kollisionszeitpunkt ausgewertet. Für die anschließende Auswertung mit dem Referenzmodell muss daher definiert werden, wie das Verhalten der anderen Akteure nach dem Kollisionszeitpunkt extrapoliert werden kann, wenn das Modell nicht oder erst zu einem späteren Zeitpunkt im Vergleich zum SuT mit dem Akteur kollidiert. Die kritischste Annahme für die Extrapolation ist, dass jeder Akteur an seiner letzten Position eine Notbremsung durchführt. Realistischer ist hingegen die Annahme einer beibehaltenen konstanten Längsbeschleunigung der Akteure. Diese Annahme ist jedoch für positive Beschleunigungen nicht konservativ. Daher werden alle positiven Längsbeschleunigungen auf  $0 \text{ m s}^{-2}$  begrenzt und bis zum Stillstand als konstant angenommen. In lateraler Richtung wird die Modellierung aus [177] übernommen, dass Akteure mit einem positiven seitlichen Abstand und einer lateralen Geschwindigkeit zum Modell hin mit konstanter seitlicher Geschwindigkeit extrapoliert werden, bis der seitliche Abstand Null ist. Bei Akteuren, die sich in der Ego-Fahrspur vor dem Modell befinden, wird keine seitliche Geschwindigkeit angenommen, sodass die Fahrzeuge ihre Position innerhalb der Fahrspur beibehalten.

Innerhalb der Simulationsumgebung existieren verschiedene Quellen für Unsicherheiten. Dazu gehören insbesondere die verwendeten Sensormodelle, das

Fahrdynamikmodell und die fehlende Berücksichtigung von Embedded Hardware im Vergleich zu einer HiL-Simulation (vgl. Einschränkungen aus Abschnitt 5.6). Für Methoden zur Validierung und Glaubwürdigkeitsargumentation der Simulationsumgebungen wird an dieser Stelle auf [81] verwiesen.

### 7.2.3.3 Evaluierung des Datensatzes aus kritischen Realdaten

Im Rahmen der Dissertation wurde basierend auf den in Abschnitt 7.2.3.1 beschriebenen Schritten ein Datensatz aus 198 kritischen Szenarien aus Dashcam-Aufnahmen rekonstruiert. Von den 198 rekonstruierten Szenarien ist in 147 Szenarien ein Unfall aufgetreten. In 51 Szenarien konnte der menschliche Fahrer einen Unfall verhindern.

Für den Datensatz wurden nur Szenarien ausgewählt, in denen der primäre Auslöser des Events nicht die Ablenkung oder Beeinträchtigung des Ego-Fahrers war. Ausgeschlossen werden damit Szenarien, bei denen Müdigkeit oder Schlafen des Fahrers sowie Fahren unter Alkohol- und Drogeneinfluss als primärer Auslöser des Events klassifiziert wurden. Die Annotationen entsprechen der in SHRP2 [115] und [100] verwendeten Klassifikation von Szenarien in NDS. Diese Einschränkung wurde auch von Chau und Liu in [208] für die Extraktion von 51 Einscherszenarien aus dem SHRP2-Datensatz eingesetzt, wovon von Olleja et al. in [194] 38 Szenarien für die Evaluierung der Referenzmodelle aus [177] verwendet wurde. Die Auswahlkriterien der Daten basieren auf dem geübten und aufmerksamen Fahrer, der in UN-Regelung Nr. 157 [177] und in dieser Dissertation als Referenz verwendet wird.

Der primäre Anwendungsfall des gesammelten Datensatzes im Rahmen dieser Dissertation ist die Evaluierung der Referenzmodelle aus UN-Regelung Nr. 157 [177] mit realen Unfalldaten menschlicher Fahrer. Wie in Abschnitt 3.3.2 diskutiert wurde, stellt die geringe Auftretensrate von kritischen Szenarien eine zentrale Herausforderung für das szenarienbasierte Testen dar (Forschungsfrage 2). Die durchgeführte Einbindung kommerzieller Flottenüberwachungssysteme für die Szenariengenerierung bietet einen vielversprechenden und skalierbaren Ansatz für die gezielte Sammlung von Unfalldaten für eine definierte ODD (vgl. Abschnitt 7.2.1).

Zur Evaluierung des Datensatzes werden nachfolgend zwei Aspekte betrachtet. Zuerst wird eine statistische Abschätzung der dem Datensatz zugrunde liegenden zurückgelegten Fahrzeugkilometer durchgeführt, um diese in Verhältnis zu Realtests und NDS zu setzen. Anschließend werden zusätzliche Anwendungsfälle der Daten im Rahmen des szenarienbasierten Testprozesses für die Erweiterung von Testdaten und die Validierung von logischen oder abstrakten Szenarien diskutiert.

Für die statistische Bewertung des Datensatzes werden basierend auf den Auftretensraten von Unfällen in der betrachteten ODD die dem Datensatz zugrunde liegende gefahrene Gesamtdistanz abgeschätzt (vgl. Tabelle 7.3). Basierend auf den in Tabelle 3.2 dargestellten Unfallraten aus [100], kann die durchschnittliche Unfallrate von Nutzfahrzeugen der Klasse 8 für die in diesem Anwendungsfall betrachtete ODD auf US-Autobahnen ermittelt werden. Als Summe der Unfallraten für alle Szenarien mit mindestens einem anderen beteiligten Verkehrsteilnehmer beträgt die durchschnittliche Unfallrate 97,7 Unfälle pro 100 Millionen zurückgelegten Fahrzeugmeilen bzw. 61,1 Unfälle pro 100 Millionen zurückgelegten Kilometern. Multipliziert man die Unfallrate mit den 147 gesammelten Unfällen, erhält man die Zahl von 240,6 Millionen zurückgelegten Kilometern als Grundlage des Datensatzes (vgl. Tabelle 7.3).

**Tabelle 7.3:** Abschätzung der dem Datensatz zugrunde liegenden zurückgelegten Fahrzeugkilometer von Nutzfahrzeugen der Klasse 8 auf US Autobahnen

Beschreibung	Wert
Durchschnittliche Unfallrate pro 100 Millionen zurückgelegten Fahrzeugkilometern, Szenarien mit mindestens einem anderen beteiligten Verkehrsteilnehmer	61,1
Unfälle im Datensatz	147
Geschätzte zurückgelegte Millionen Fahrzeugkilometer des Datensatzes	240,6

Während im Rahmen dieser Abschätzung die Einschränkung des SuT auf Nutzfahrzeuge der Klasse 8 sowie der ODD auf US-Autobahnen getroffen

wurde (vgl. Abschnitt 7.2.1), werden keine Korrekturfaktoren z. B. für lokale Unterschiede zwischen Autobahnabschnitten, Tageszeiten oder Wetterbedingungen berücksichtigt. Für eine genauere Betrachtung der Faktoren wird auf die Untersuchung in [100] verwiesen, um eine detaillierte Analyse der Faktoren gegenüber den betrachteten nationalen Durchschnittswerten durchzuführen.

Zum Vergleich beeinhaltet der highD-Datensatz [84] 44,5 Tausend Kilometer und die bisher größte NDS SHRP2 [115] 56 Millionen gefahrene Kilometer. Für Serienentwicklungsprojekte von ADAS werden Testkilometer im ein- bis zweistelligen Millionenbereich durchgeführt [209]. Das Unternehmen Waymo hat Stand Dezember 2024 mit der Flotte von hochautomatisierten Taxis eine Gesamtdistanz von 80 Millionen Kilometern zurückgelegt [210]. Während die genannten Datenquellen den Vorteil einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung im Vergleich zu den Event-getriggerten Dashcam-Aufnahmen bieten, ist mit der erzielbaren Gesamtlaufleistung die Identifikation kritischer Realdaten begrenzt.

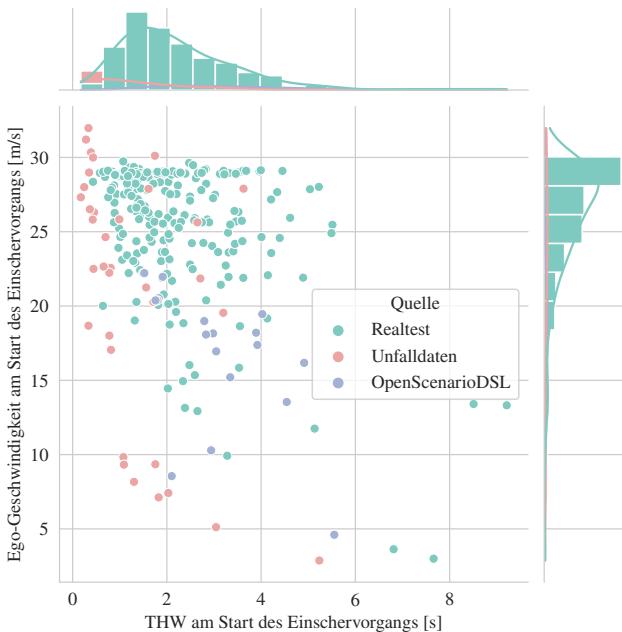
Im Gegensatz dazu wurden mit Systemen des Anbieters Lytx für alle Fahrzeugklassen im Jahr 2023 insgesamt 64 Milliarden Kilometer zurückgelegt [211]. Für die Generierung der Unfallstatistiken in [100] wurden Daten des Anbieters SmartDrive verwendet, bei denen in zwei Jahren gefiltert für Nutzfahrzeuge der Klasse 8 insgesamt 5,5 Milliarden Kilometer auf US-Autobahnen von den 331 involvierten Kundenfлотten gefahren wurden. Ausgehend von der vorhandenen Verbreitung der Systeme ist die Skalierbarkeit bei der Gewinnung von kritischen Realdaten lediglich durch die verfügbaren Ressourcen für den Erwerb und die Rekonstruktion der Unfallaufzeichnungen limitiert. Mit einer zunehmenden Automatisierung der in Abschnitt 7.2.3.1 beschriebenen Schritte zur Überführung von Aufzeichnungen in simulierbare Szenarien ist hier eine weitere Steigerung der Datenverfügbarkeit erreichbar.

Als zweiter Aspekt wird die Erweiterung von mit Testfahrzeugen gesammelten Fahrdaten durch kritische Realdaten aus Dashcam-Aufnahmen betrachtet. Durch die gezielte Gewinnung von kritischen Szenarien kann eine Reduktion von unbekannten Szenarien gemäß ISO 21448 erreicht werden, die aufgrund der geringen Auftretensraten nicht oder in geringerem Umfang mit Realtests

möglich ist (vgl. Problem des distanzbasierten Testens in Abschnitt 3.3.2). Die Hypothese ist dabei, dass kritische Szenarien an den Randbereichen der Parameterverteilungen von definierten logischen Szenarien liegen und eingesetzt werden können, um die Grenzen der innerhalb der ODD auftretenden Parameter zu definieren.

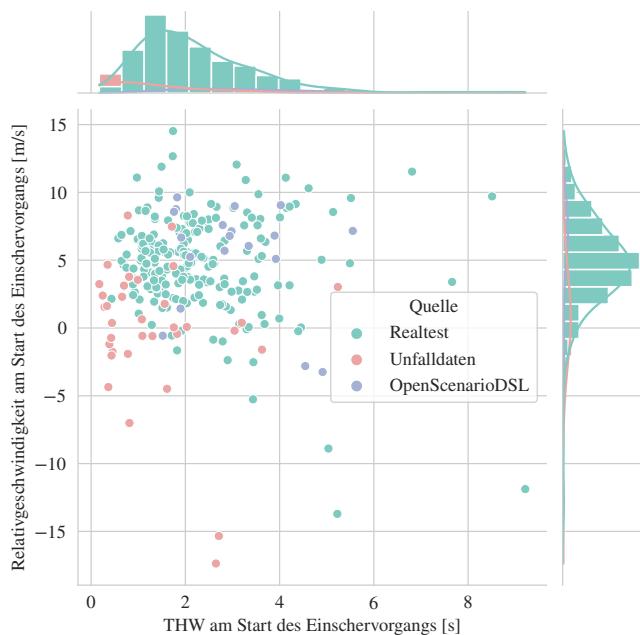
Zur Untersuchung der Hypothese wurde der gesammelte Datensatz mit der StreetWise-Methode [91] analysiert und die Parameter der identifizierten Szenarien extrahiert (vgl. Abschnitt 3.3.1). Abb. 7.13 zeigt die Parameterverteilung des Einscherszenarios der kritischen Daten im Vergleich zu gesammelten Realtestdaten und in OpenSCENARIO DSL modellierten Simulationsszenarien. Dabei zeigt sich, dass die kritischen Realdaten tatsächlich im Randbereich von kleinen THW-Werten des einscherenden Fahrzeugs im Vergleich zu den Realtestdaten liegen, was mit einer hohen Kritikalität der Szenarien korreliert. Zu erkennen ist auch, dass in den kritischen Daten fünf Szenarien oberhalb einer Ego-Geschwindigkeit von  $30 \text{ m s}^{-1}$  liegen, was im Realtest nicht beobachtet wurde. Dies liegt am Überschreiten des in vielen Bundesstaaten geltenden Geschwindigkeitslimits von  $65 \text{ mph}$  bzw.  $29 \text{ m s}^{-1}$  durch den menschlichen Fahrer, was in [100] als ein Risikofaktor für die Entstehung von kritischen Szenarien identifiziert wurde (vgl. Abschnitt 6.2).

Als dritte Datenquelle sind extrahierte Parameter aus Simulationen eingezeichnet, die basierend auf einem in der Szenariensprache OpenSCENARIO DSL modellierten Einscherszenario erzeugt wurden (vgl. Abschnitt 3.2.1.3). Für die zur Illustration eingesetzte Szenariendefinition wird im Vergleich mit den Daten aus dem Realtest und den kritischen Daten festgestellt, dass eine zu geringe obere Grenze für den Parameter der Ego-Geschwindigkeit gewählt wurde. Damit deckt die Szenarienbeschreibung nicht den in der ODD beobachteten Parameterraum ab. Basierend auf den beiden Datenquellen können die Parametergrenzen erweitert werden und somit eine Validierung der Szenarienbeschreibung basierend auf Realdaten durchgeführt werden [218].



**Abbildung 7.13:** Vergleich der Parameterverteilung des Einscherszenarios aus rekonstruierten kritischen Szenarien

Auch bei Betrachtung der Relativgeschwindigkeit des einscherenden Fahrzeugs gegenüber dem Ego-Fahrzeug am Beginn des Einschervorgangs wird die Lage der kritischen Daten im Randbereich deutlich, verglichen mit der Parameterverteilung des Realtests (vgl. Abb. 7.14). In den Szenarien liegt eine umso höhere Kritikalität vor, je niedriger der Wert der Relativgeschwindigkeit des Einscherers gegenüber dem Ego ist, d.h. je langsamer das einscherende Fahrzeug im Vergleich zum Ego-Fahrzeug fährt. Somit ist in diesem Fall eine Erweiterung der Parametergrenzen der Simulationsszenarien notwendig, um den gesamten Parameterraum des Szenarios in der ODD abzudecken.



**Abbildung 7.14:** Vergleich der Parameterverteilung des Einscherszenarios aus rekonstruierten kritischen Szenarien

Zusammenfassend wurde in diesem Abschnitt gezeigt, dass eine unterschiedliche Eignung von Datenquellen für die Sammlung von kritischen Realdaten im Rahmen des in dieser Dissertation entwickelten Prozesses zur Freigabeargumentation vorliegt. Basierend auf einer ODD- und Szenariodefinition (vgl. Nachweis S7.2.1 in Abb. 7.8) ergibt der Vergleich der Datenquellen (vgl. Tabelle 3.3) die beste Bewertung der Anforderungen des Prozesses für Daten aus einer NDS. Entscheidende Faktoren sind die Verfügbarkeit von kritischen Realdaten mit und ohne Unfallfolgen, die Datenqualität sowie die Möglichkeit, basierend auf den Daten menschlicher Fahrer den Referenzfahrer im Rahmen der Freigabeargumentation zu bewerten. Speziell wurden Dashcam-Aufnahmen von Nutzfahrzeugflotten aufgrund der erzielbaren Datenmenge

als vielversprechende Datenquelle ausgewählt, um gezielt kritische und unbekannte Szenarien innerhalb der ODD zu sammeln (vgl. Nachweis S7.2.2 in Abb. 7.8).

Mit der Generierung von ausführbaren Szenarien aus den Dashcam-Aufnahmen wird der Test des SuT in den rekonstruierten kritischen Szenarien unter Verwendung von XiL-Umgebungen ermöglicht (vgl. Nachweis S7.2.3 in Abb. 7.8). Eine statistische Abschätzung zeigt, dass der gesammelte Datensatz mit 147 Unfällen einer zugrunde liegenden Fahrleistung der Nutzfahrzeugflotten von 240 Millionen Kilometern entspricht. Als zusätzlicher Aspekt wurde die Validierung des Parameterraums von logischen oder abstrakten Szenarien durch die gezielte Sammlung von kritischen Realdaten betrachtet. Dies ermöglicht die Abdeckung von Randbereichen des Parameterraums, die mit klassischen Realtests nur mit einem erheblich höheren Kostenaufwand erzielbar wäre.

### **7.3 Anwendung der Akzeptanzkriterien als Teil der szenarienbasierten Freigabeargumentation**

Abb. 7.15 zeigt den aus Prozessschritt 3 (vgl. Abschnitt 5.1.3) resultierenden Teil der GSN in Abb. 7.1, der in den folgenden Abschnitten beschrieben wird. Zuerst werden die in Abschnitt 7.1 entwickelten Erweiterungen des FSM evaluiert, wobei die erste Evaluierung des FSM für rekonstruierte reale Unfalldaten durchgeführt wird (vgl. Nachweis S7.3.1 und Abschnitt 7.3.1). Anschließend werden die Ergebnisse des Modells zur Bewertung des SuT-Systemverhaltens in den kritischen Szenarien eingesetzt (vgl. Nachweis S7.3.2 und Abschnitt 7.3.2).

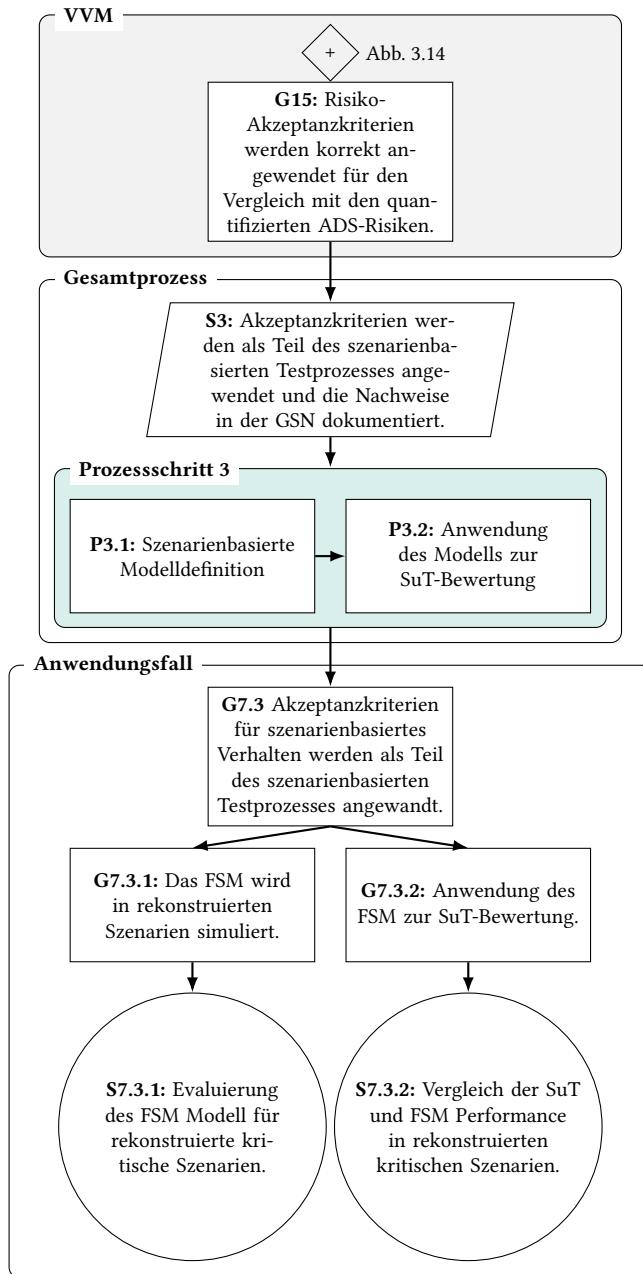


Abbildung 7.15: Ergebnis GSN Prozessschritt 3 (vgl. Abb. 7.1)

### 7.3.1 Szenarienbasierte Modelldefinition

Die in Abschnitt 7.1 entwickelten Erweiterungen des FSM und das abgeleitete Akzeptanzkriterium für szenarienbasiertes Verhalten werden mit drei verschiedenen Szenarienquellen evaluiert. Neben den Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 wird das Modell für reale Fahrdaten aus dem highD-Datensatz angewendet. Anschließend wird die Kollisionsvermeidung des Modells für den gesammelten Datensatz von kritischen Realdaten mit dem menschlichen Fahrer verglichen.

#### 7.3.1.1 Evaluierung der Modellerweiterung für Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157

Zur Bewertung des vorgeschlagenen Evaluationskonzepts und der Erweiterung des FSM werden zwei Aspekte untersucht. Zuerst wird die Auswirkung auf die Performance im Vergleich zum ursprünglichen FSM im Rahmen der in [177] definierten ALKS-Szenarien evaluiert. Das Ziel ist nachzuweisen, dass die Modellerweiterungen in Abschnitt 7.1.1 keinen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Modells innerhalb der Szenarien haben. Der Nachweis ist notwendig, damit das erweiterte Referenzmodell mindestens die gleiche oder eine bessere Performance im Vergleich zu dem in UN-Regelung Nr. 157 definierten FSM erzielt und in diesem Anwendungsfall zur Evaluierung von Systemen mit SAE-Level 4 eingesetzt werden kann.

Für die Evaluierung werden Varianten des FSM mit verschiedenen Erweiterungen untersucht, um die Auswirkungen des eingeführten TTC-Schwellenwertes und der angepassten CFS-Metrik separat zu bewerten. Mit allen möglichen Kombinationen der modifizierten CFS-Metrik (bezeichnet als FSM-mod) und den beiden Parameterwerten für den TTC-Schwellenwert (vgl. Tabelle 7.1), einschließlich der unveränderten Variante mit  $TTC_{th} = \infty$ , werden sechs Modellkonfigurationen betrachtet (vgl. Tabelle 7.4).

**Tabelle 7.4:** Varianten der evaluierten Modellerweiterungen

Name	$TTC_{th}$ [s]	Modifizierte CFS Metrik
FSM	$\infty$	Nein
FSM-mod	$\infty$	Ja
FSM-8.5	8.5	Nein
FSM-8.5-mod	8.5	Ja
FSM-11	11.0	Nein
FSM-11-mod	11.0	Ja

Eine Bewertung der drei ALKS-Szenarien (vgl. Abschnitt 4.1) wird unter Verwendung des von Mattas u. a. eingeführten Simulationsframeworks durchgeführt<sup>1</sup>. Die verwendeten Parametergrenzen und die Schrittweite sind identisch mit der in Abschnitt 4.1.4 durchgeföhrten Bewertung.

### Einscherszenario

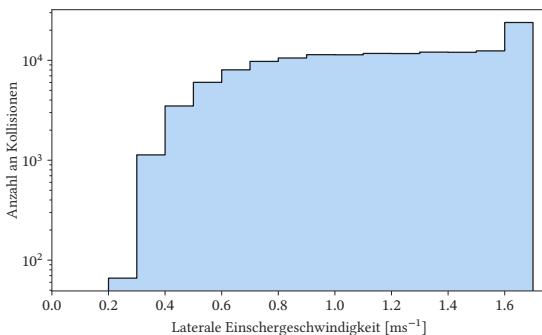
Im Einscherszenario hat nur der eingeföhrte TTC-Schwellenwert einen Einfluss auf das Verhalten des Modells. Die modifizierte CFS-Metrik hat aufgrund der in [177] definierten konstanten Längsgeschwindigkeit des einscherenden Fahrzeugs keine Auswirkungen. Daher wird nur ein Vergleich zwischen den Modellvarianten mit verschiedenen TTC-Schwellenwerten durchgeföhrten (vgl. Tabelle 7.5).

**Tabelle 7.5:** Kontingenztafel der Kollisionen für gewählte  $TTC_{th}$ -Schwellenwerte im Einscher-szenario

		Keine Kollision	Kollision	
				$\Sigma$
		Keine Kollision	Kollision	
FSM		Keine Kollision	Kollision	
Keine Kollision	FSM-8.5	91274	0	91274
Kollision	FSM-11	0	7006	7006
$\Sigma$		91274	7006	98280

<sup>1</sup> <https://github.com/ec-jrc/JRC-FSM>

Entgegen der Erwartung zeigt die Einbeziehung des Schwellenwertes keine Unterschiede in den Kollisionsregionen, obwohl bei niedrigen lateralen Einschergeschwindigkeiten unter  $0.2 \text{ m s}^{-1}$  eine spätere Reaktion des Modells aufgrund des Schwellenwertes zu erwarten wäre. Eine Untersuchung der Anzahl der Kollisionen in Zusammenhang mit den lateralen Einschergeschwindigkeiten zeigt, dass innerhalb des Bereichs, in dem der eingeführte Schwellenwert eine veränderte Reaktion auslösen könnte, aufgrund der geringen lateralen Geschwindigkeit keine Kollisionen beobachtet werden (vgl. Abb. 7.16). Somit wird trotz der Einführung des TTC-Schwellenwertes zur Reduzierung der Falsch-Positiv-Rate des Modells die gleiche Performance im Einscherszenario nach [177] erreicht.



**Abbildung 7.16:** Anzahl der Kollisionen des FSM in Bezug auf die laterale Geschwindigkeit des Einscherers

### Ausscherszenario

Auch für das Ausscherszenario ergibt sich keine Änderung der Modellperformance (siehe Tabelle 7.6). Dies ist darauf zurückzuführen, dass in UN-Regelung Nr. 157 [177] keine Verzögerung des ausscherenden oder verdeckten Fahrzeugs berücksichtigt wird, die sich auf die modifizierte CFS-Metrik auswirken könnte. Ebenso wird die laterale Sicherheitsprüfung, die durch den TTC-Schwellenwert beeinflusst werden würde, nicht berücksichtigt, da sich das ausscherende und verdeckte Fahrzeug in der Ego-Fahrspur befinden.

**Tabelle 7.6:** Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der modifizierten CFS-Metrik für das Ausscherszenario

FSM	FSM-mod	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
	Keine Kollision	5801	0	5801
Kollision	0	49	49	
$\Sigma$	5801	49	5850	

### Bremsszenario

Für das Bremsszenario hat nur die Änderung der CFS-Metrik einen Einfluss auf die Leistung des Modells, da für das vorausfahrende, in der Fahrspur befindliche Fahrzeug keine laterale Sicherheitsüberprüfung notwendig ist. Daher werden die beiden Konfigurationen FSM und FSM-mod miteinander verglichen. Sowohl das unveränderte FSM als auch das Modell mit modifizierter CFS sind in der Lage, in allen Szenarien eine Kollision zu verhindern (vgl. Tabelle 7.7). Damit hat die Modellerweiterung keine Änderung der Bewertung zwischen vermeidbaren und nicht vermeidbaren Kollisionen im Bremsszenario zur Folge.

**Tabelle 7.7:** Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der modifizierten CFS-Metrik für das Bremsszenario

FSM	FSM-mod	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
	Keine Kollision	1121	0	1121
Kollision	0	0	0	
$\Sigma$	1121	0	1121	

Zusammenfassend erreicht das erweiterte Modell in allen drei Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [177] die Performance des ursprünglichen FSM. Damit wird nachgewiesen, dass keine der eingeführten Modellerweiterungen in Abschnitt 7.1.1 einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Modells innerhalb der ALKS-Szenarien hat. Folglich erfüllt das erweiterte Modell die in

UN-Regelung Nr. 157 [177] definierten Anforderung an die Kollisionsvermeidung des Referenzmodells eines geübten und aufmerksamen menschlichen Fahrers.

### Einscher- und Bremsszenario

Darüber hinaus wird die Analyse eines kombinierten Einscher- und Bremszenario durchgeführt, das über die in [177] definierten Szenarien hinausgeht. Das kombinierte Szenario basiert auf dem Einscherszenario eines Fahrzeugs von einer benachbarten Fahrspur mit einer zusätzlichen konstanten Verzögerung in Längsrichtung. Die Quergeschwindigkeit des einscherenden Fahrzeugs wird wie in [177] als konstant angenommen, bis das einscherende Fahrzeug durch die Abbremsung zum Stillstand kommt. Der Parameterraum des Einscherszenarios aus Tabelle 4.3 wird um die Variation der Verzögerung des einscherenden Fahrzeugs während des Spurwechsels erweitert (vgl. Tabelle 7.8).

**Tabelle 7.8:** Parameterbereiche des kombinierten Einscher- und Abbremszenarios

	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Schrittweite</b>
$d_{x,0}$	1 m	120 m	2 m
$v_y$	$0.1 \text{ m s}^{-1}$	$1.8 \text{ m s}^{-1}$	$0.1 \text{ m s}^{-1}$
$v_{e,0}$	$10 \text{ km h}^{-1}$	$130 \text{ km h}^{-1}$	$10 \text{ km h}^{-1}$
$v_{o,0}$	$10 \text{ km h}^{-1}$	$v_{e,0}$	$10 \text{ km h}^{-1}$
$G_{x,\max}$	$0 \text{ m s}^{-2}$	$7 \text{ m s}^{-2}$	$1 \text{ m s}^{-2}$

Aufgrund der Abbremsung und der seitlichen Bewegung des einscherenden Fahrzeugs können sich sowohl die modifizierte CFS-Metrik als auch der TTC-Schwellenwert auf die Kollisionsbereiche auswirken. Daher wird die Bewertung beider Änderungen zunächst getrennt vorgenommen. Zuerst werden die Kollisionsbereiche der modifizierten CFS-Metrik FSM-mod mit dem ursprünglichen FSM verglichen (vgl. Tabelle 7.9).

**Tabelle 7.9:** Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der Änderung der CFS-Metrik für das Einscher- und Bremsszenario

FSM-mod \\ FSM	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
Keine Kollision	640104	440	640544
Kollision	38623	107073	145696
$\Sigma$	678727	107513	786240

Für den erweiterten Parameterraum werden 786.240 Parameterkombinationen ausgewertet. Von diesen Fällen weist das FSM 145.696 Kollisionsfälle auf, die das modifizierte FSM-mod um 38.623 Fälle reduziert. Allerdings kommen insgesamt 440 Kollisionsfälle hinzu, die das ursprüngliche Modell vermeidet. Bei genauerer Betrachtung dieser Fälle handelt es sich um Szenarien, bei denen das modifizierte Modell aufgrund der Berücksichtigung der Verzögerung des einscherenden Fahrzeugs in der modifizierten CFS-Metrik stärker abbremst. Dadurch kommt es zur Kollision des einscherenden Fahrzeugs mit dem Heck des Ego-Fahrzeugs, während das einscherende Fahrzeug beim ursprünglichen FSM hinter dem weniger verzögernden Ego-Fahrzeug einschert. Dieser Grenzbereich des FSM und des erweiterten FSM könnte zukünftig durch die Erweiterung der lateralen Sicherheitsprüfung ausgeschlossen werden, indem keine Bremsung durch das Modell erfolgt, wenn sich der projizierte Einscherpunkt des anderen Fahrzeugs hinter dem Ego-Fahrzeug befindet. Insgesamt wird durch die Einführung der modifizierten CFS-Metrik eine Reduzierung der Kollisionen im kombinierten Einscher- und Bremsszenario von 145.696 für das FSM zu 107.515 für das FSM-mod erzielt. Dies entspricht einer Reduzierung der Kollisionen um 26,2%.

Zweitens wird die Auswirkung des lateralen TTC-Schwellenwertes bewertet (vgl. Tabelle 7.11 und Tabelle 7.10). Der Vergleich zeigt eine Änderung der Kollisionszahlen zwischen den drei Modellvarianten. Während der geringere Schwellenwert  $TTC_{th} = 8.5 \text{ s}$  zur Reduzierung von insgesamt 115 Kollisionen führt, können 589 Kollisionen nicht mehr vermieden werden, was insgesamt einer Steigerung um 0.41% entspricht (vgl. Tabelle 7.10).

**Tabelle 7.10:** Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der Änderung des TTC-Schwellenwerts  $TTC_{th} = 8.5$  s für das Einscher- und Bremsszenario

<b>FSM-8.5-mod</b>	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
<b>FSM-mod</b>			
Keine Kollision	678168	589	678727
Kollision	115	107398	107513
$\Sigma$	678283	107957	786240

Der Schwellenwert  $TTC_{th} = 11$  s führt zur Reduzierung von 23 Kollisionen, während 425 Kollisionen nicht mehr vermieden werden, was insgesamt einer Steigerung um 0.37% entspricht (vgl. Tabelle 7.11).

**Tabelle 7.11:** Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der Änderung des TTC-Schwellenwerts  $TTC_{th} = 11$  s für das Einscher- und Bremsszenario

<b>FSM-11-mod</b>	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
<b>FSM-mod</b>			
Keine Kollision	678302	425	678727
Kollision	23	107490	107513
$\Sigma$	678325	107915	786240

Der zur Reduzierung der hohen Sensitivität des FSM eingeführte laterale TTC-Schwellenwert hat folglich je nach gewähltem Schwellenwert eine geringfügige Steigerung der Kollisionen um ca. 0.4% zur Folge. Diese Steigerung muss nachfolgend gemeinsam mit der Änderung der CFS-Metrik sowie der verbesserten praktischen Anwendbarkeit des Modells für Realdaten durch die Reduzierung der hohen Falsch-Positiv-Rate des FSM abgewogen werden.

Hierzu wird das ursprüngliche FSM aus [177] mit dem erweiterten FSM-8.5-mod inklusive der modifizierten CFS-Metrik und dem TTC-Schwellenwert  $TTC_{th} = 8.5$  s verglichen (vgl. Tabelle 7.12). In Summe beider Modellerweiterungen wird eine Reduzierung der Kollisionen von 145.696 für das FSM zu 107.957 für das FSM-8.5-mod erreicht. Dies entspricht einer Reduzierung der Kollisionen um 25,9%. Damit wird die geforderte verbesserte Performance des Referenzmodells in Szenarien erzielt, in denen statt der in [177] getroffenen

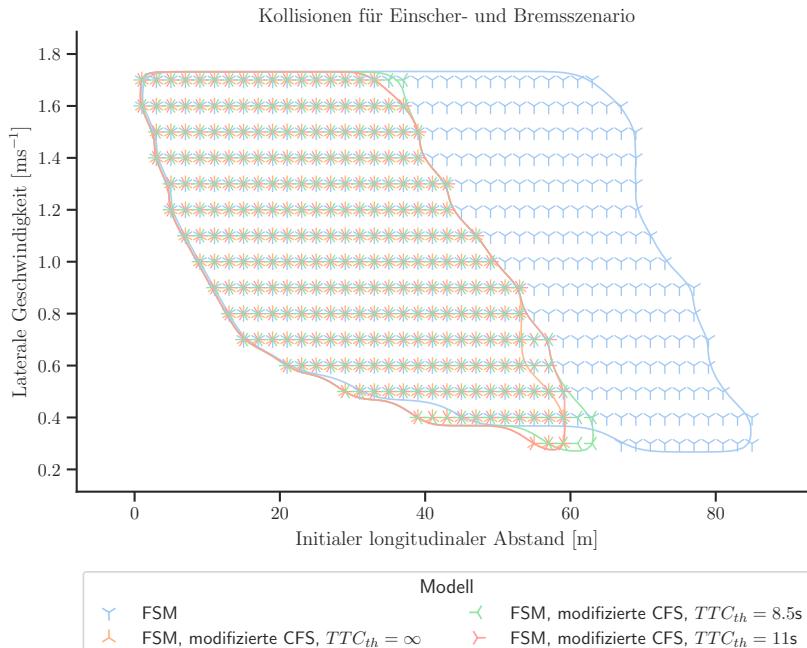
Vereinfachung einer konstanten Geschwindigkeit von einscherenden Fahrzeugen eine gleichzeitige Verzögerung berücksichtigt wird.

**Tabelle 7.12:** Vergleich der Kollisionsbereiche des ursprünglichen FSM mit dem FSM-8.5-mod-Modell

FSM	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
Keine Kollision	640105	439	640544
Kollision	38178	107518	145696
$\Sigma$	678283	107957	786240

Eine vollständige Kontingenztafel sowie Visualisierungen der Kollisionsregionen über den gesamten Parameterraum des Szenarios sind in Abschnitt A.2 dargestellt. Ein Beispiel für die Veränderung der Kollisionsbereiche zwischen den Modellvarianten wird für einen Ausschnitt des Parameterraums mit  $G_{x,\max} = 7 \text{ m s}^{-2}$ ,  $v_{e,0} = 120 \text{ km s}^{-1}$  und  $v_{o,0} = 100 \text{ km s}^{-1}$  analysiert (vgl. Abb. 7.17).

Die aufgetretenen Kollisionen der Modellvarianten sind mit unterschiedlichen Markern gekennzeichnet. Die Grenzen der Kollisionsbereiche werden durch durchgezogene Linien in der jeweiligen Markerfarbe dargestellt. Blaue Markierungen kennzeichnen das ursprüngliche FSM, das den größten Kollisionsbereich innerhalb des Parameterraums aufweist. Die orangefarbenen Markierungen zeigen die Kollisionen von FSM-mod, bei dem die modifizierte CFS-Metrik verwendet wird. Durch die Berücksichtigung der Verzögerung des einscherenden Fahrzeugs in der CFS-Metrik kann das Modell auch für geringere initiale Abstände im Vergleich zum FSM Kollisionen verhindern. Die Kollisionen der Modelle mit dem TTC-Schwellenwert werden durch grüne und rote sowie anders orientierte Markierungen dargestellt. Während sich die Mehrzahl der Kollisionen mit FSM-mod überschneidet, sind, wie zuvor in Tabelle 7.10 und Tabelle 7.11 beobachtet, zusätzliche Kollisionen für niedrige laterale Geschwindigkeiten am Rand der Kollisionsregion zu beobachten.



**Abbildung 7.17:** Kollisionsbereiche für verschiedene Modellvarianten mit  $G_{x,\max} = 7 \text{ m s}^{-2}$ ,  $v_{e,0} = 120 \text{ km h}^{-1}$  und  $v_{o,0} = 100 \text{ km h}^{-1}$

Zusammenfassend zeigt die Evaluierung der ALKS-Szenarien, dass die Änderung der CFS-Metrik zu einer deutlichen Verbesserung der Modellperformance innerhalb des kombinierten Einscher- und Bremsszenarios führt, während der TTC-Schwellenwert nur geringe Auswirkungen an den Rändern der Kollisionsregion hat.

### 7.3.1.2 Evaluierung des Referenzmodells für den highD-Datensatz

Für die Evaluierung der Modellderweiterung wird im nächsten Schritt das Referenzmodell auf reale Fahrdaten angewendet. Für die Identifikation falsch-positiver Ergebnisse wird eine Bewertung anhand von alltäglichen Szenarien analog zur Bewertung von Mattas et al. [183] durchgeführt. Szenarien werden

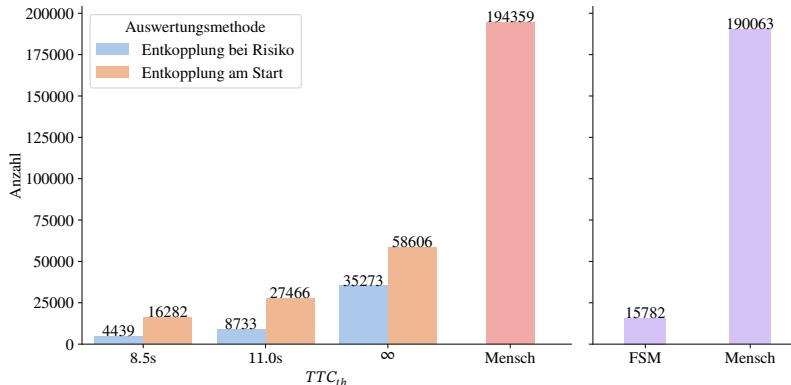
als falsch-positiv eingestuft, wenn das Referenzmodell eine Bremsung durchführt, obwohl kein Verkehrskonflikt vorliegt, der eine Bremsreaktion erfordert. Hierzu werden unkritische Szenarien aus dem HighD-Datensatz extrahiert [84]. Als unkritisch werden Szenarien mit Paaren von Fahrzeugen auf benachbarten Fahrspuren bezeichnet, bei denen keines der beiden Fahrzeuge einen Spurwechsel vornimmt und sich ein Fahrzeug dauerhaft in Längsrichtung vor dem anderen Fahrzeug befindet [183]. Insgesamt werden 246.146 Fälle aus dem Datensatz identifiziert.

Insgesamt sechs verschiedene Modellvarianten werden für die extrahierten Szenarien verglichen. Da die Änderung der CFS-Metrik keinen direkten Einfluss darauf hat, ob eine Bremsreaktion durchgeführt wird, wird diese Änderung nicht bewertet. Der eingeführte laterale TTC-Schwellenwert beeinflusst die Sensitivität der lateralen Sicherheitsprüfung und damit die Zahl der falsch-positiven Reaktionen direkt. Daher werden die drei lateralen Schwellenwerte  $TTC_{th} \in \{8.5\text{ s}, 11\text{ s}, \infty\}$  verglichen, wobei die letzte Variante dem unveränderten FSM ohne Schwellenwert entspricht. Zusätzlich werden die folgenden beiden Auswertemethoden unterschieden.

**Entkopplung bei Risiko** erfolgt analog zu dem in Abschnitt 7.1.1.1 eingeführten Evaluierungskonzept, bei dem der kinematische Zustand des Modells gleich dem Zustand des Ego-Fahrzeugs (des folgenden Fahrzeugs) gesetzt und nur dann entkoppelt wird, wenn das Modell ein Risiko feststellt.

**Entkopplung am Start** initialisiert das Modell mit dem initialen kinematischen Zustand des Ego-Fahrzeugs, der unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs fortgesetzt wird, bis das Modell eine Reaktion ausführt. Diese Auswertemethode ist identisch mit dem Ansatz, den Mattas et al. verwenden [183].

Zunächst wird die Annahme aus [183] verwendet, dass jede Abbremsung des Ego-Fahrzeugs als falsch-positiv eingestuft wird, unabhängig davon, mit welchem Betrag oder welcher Dauer die Abbremsung erfolgt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Auswertemethode als auch der laterale TTC-Schwellenwert die Anzahl der falsch-positiven Reaktionen erheblich beeinflusst (vgl. Abb. 7.18).



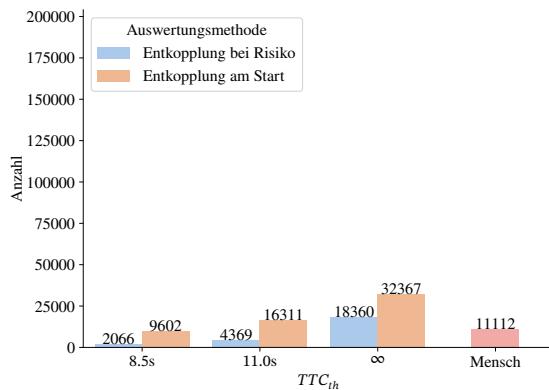
**Abbildung 7.18:** Falsch-positive Reaktionen nach Modellvariante und Auswertemethode, verglichen mit den Ergebnissen aus [183]

Die Auswertemethode „Entkopplung am Start“ zeigt ohne TTC-Schwellenwert 58.606 falsch-positive Reaktionen, die durch die Auswertemethode „Entkopplung bei Risiko“ auf 35.273 reduziert werden. Die Einführung des TTC-Schwellenwerts von  $TTC_{th} = 11\text{ s}$  senkt die Anzahl der falsch-positiven Reaktionen auf 27.466 bzw. 8.733 je nach Auswertemethode. Der niedrigste TTC-Schwellenwert von  $TTC_{th} = 8.5\text{ s}$  führt zur niedrigsten Falsch-Positiv-Rate mit 16.282 bzw. 4.439 falsch-positiven Reaktionen. Dies entspricht einer Reduktion um 72,2% bzw. 87,4% im Vergleich zur Auswertung ohne TTC-Schwellenwert.

Der menschliche Fahrer des Ego-Fahrzeugs zeigt in insgesamt 194.359 Fällen eine Bremsung (rot). Wie Mattas et al. [183] anmerken, kann aus den extrahierten Fahrzeugpaaren jedoch nicht eindeutig festgestellt werden, ob die Bremsreaktion des menschlichen Fahrers aufgrund des Fahrzeugs auf der benachbarten Spur, oder eines anderen Fahrzeugs oder Umstands resultiert. Vergleicht man die Ergebnisse mit denen von Mattas et al. [183] (lila), wird eine ähnliche Anzahl von menschlichen Bremsreaktionen aus den highD-Daten extrahiert. Trotz identischer Konfigurationen von „Entkopplung am Start“ und  $TTC_{th} = \infty$  wurde hingegen eine höhere Anzahl der falsch-positiven Reaktionen des ursprünglichen FSM ermittelt.

Mit der Definition jeder Bremsreaktion als falsch-positive Reaktion und der daraus resultierenden hohen Anzahl menschlicher Reaktionen erscheint die Falsch-Positiv-Rate in Abb. 7.18 akzeptabel klein. Abb. 7.18 zeigt, dass menschliche Fahrer im alltäglichen Fahrverhalten in 194.359 der 246.146, und damit in 79,0% der Szenarien, eine geringfügige Verlangsamung zeigen, die als falsch-positiv bewertet wurde. Wird jedoch nachfolgend ein Schwellenwert für die Bremsbeschleunigung verwendet, sinkt die Anzahl der für den menschlichen Fahrer als falsch-positiv bewerteten Szenarien deutlich.

Hierzu wird der Schwellenwert  $a_{th,Brems} = -1.3 \text{ m s}^{-2}$  der Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs für die Bewertung als falsch-positive Reaktion gewählt. Der Wert stammt aus UN-Regelung Nr. 13-H [212] für die Typgenehmigung von PKW in Bezug auf deren Bremssysteme und wird dort als Kriterium für die Aktivierung des Bremslichts bei einer Bremsung vorgeschrieben. Unter Verwendung des Schwellenwertes werden nur 11.112 Fälle als Bremsmanöver bewertet, bei denen eine Aktivierung des Bremslichts erfolgen würde (vgl. Abb. 7.19). Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist die gleiche Achsskalierung wie zuvor in Abb. 7.18 gewählt.



**Abbildung 7.19:** Falsch-positive Reaktionen nach Modellvariante und Auswertemethode unter Verwendung einer Reaktionsschwelle von  $a_{th,Brems} = -1.3 \text{ m s}^{-2}$

Unter Verwendung des gleichen Schwellenwerts zur Bewertung der Modellreaktionen als falsch-positiv ergibt sich etwa eine Halbierung der Falsch-Positiv-Rate. Dies zeigt, dass die Falsch-Positiv-Rate des FSM mit Bremsmanövern unterhalb  $-1.3 \text{ m s}^{-2}$  sogar höher ist als die Falsch-Positiv-Rate der menschlichen Fahrer im betrachteten Datensatz. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer Reduzierung der Modellsensitivität gegenüber der lateralen Sicherheitsprüfung, die durch die Einführung des lateralen TTC-Schwellenwerts erreicht wird.

Zusammenfassend wird der Schluss gezogen, dass sowohl die Auswertemethode „Entkopplung bei Risiko“ als auch die Einführung des TTC-Schwellenwertes einen erheblichen Vorteil für die Anwendbarkeit des Modells sowie die Reduzierung der Sensitivität des FSM ermöglichen. Im Rahmen dieses Anwendungsfalls wird daher unter Abwägung der in Abschnitt 7.3.1.1 erreichten gleichen Performance des erweiterten Modells in den ALKS-Szenarien, der Reduzierung von Kollisionen im kombinierten Einscher- und Bremsszenario um 25,9% und der deutlichen Reduktion der Falsch-Positiv-Rate um 87,4% das Modell FSM-8.5-mod als Referenzmodell verwendet.

### **7.3.1.3 Validierung des Referenzmodells basierend auf kritischen Realdaten**

Im dritten und letzten Schritt zur Evaluierung der Erweiterungen des FSM wird das erweiterte Referenzmodell auf die in Abschnitt 7.2 gesammelten kritischen Realdaten angewandt. Mattas et al. [183] evaluieren das FSM basierend auf dem highD-Datensatz, der jedoch keine Unfälle und Beinahe-Unfälle enthält. Daher stellen die Autoren fest, dass für eine umfangreiche Validierung ein umfangreicherer Datensatz mit kritischeren Szenarien und Unfalldaten erforderlich ist [183].

Olleja et al. [194] führen in [194] die erste Validierung der Modelle aus UN-Regelung Nr. 57 basierend auf 38 Beinahe-Unfällen in Einscherszenarien aus dem SHRP2-Datensatz durch. Für das CCHD-Modell wird eine verspätete Reaktion und geringere Performance im Vergleich zu den menschlichen Fahrern

festgestellt, die in drei Szenarien zu einem Unfall des Modells führt. Während das FSM ein konservativeres und vorausschauenderes Fahrverhalten zeigt und in keinem der Szenarien eine Kollision verursacht, zeigt das Modell eine hohe Sensitivität und übervorsichtiges Bremsverhalten. Aus diesem Grund wurden die in Abschnitt 7.1 definierten Modellerweiterungen entwickelt und evaluiert.

Eine Validierung der Modelle mit realen Unfällen und Beinahe-Unfällen wird in dieser Dissertation erstmalig vorgestellt. Der in Abschnitt 7.2 ausgewählte Datensatz aus rekonstruierten Dashcam-Aufnahmen enthält hierfür sowohl Unfälle als auch Beinahe-Unfälle (vgl. Abschnitt 3.3.2). Beinahe-Unfälle sind für die Bewertung von Bedeutung, um auch Fälle zu entdecken, in denen der menschliche Fahrer in der Lage wäre, das Referenzmodell zu übertreffen. Diese Fälle können mit Unfalldatenbanken nicht identifiziert werden.

Von den gesammelten kritischen Szenarien werden insgesamt 50 Fälle der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Einscher-, Ausscher- oder Bremsszenarien analysiert. Dabei werden nur Szenarien mit anderen Fahrzeugen als Konfliktpartner betrachtet. Für andere gewonnene Szenarien mit Fußgängern, Tieren sowie statischen oder bewegten Objekten ist das Modell nicht anwendbar. 42 der Szenarien enden mit einer Kollision zwischen einem Akteur und dem menschlichen Fahrer, während in 8 Fällen ein Unfall durch die Reaktion des menschlichen Fahrers verhindert werden konnte. Zu den Zielen dieser Bewertung gehört die Klärung der Frage, ob es in den betrachteten Szenarien Fälle gibt, in denen das Referenzmodell die Leistung des menschlichen Fahrers übertrifft und Kollisionen verhindern kann. Ebenso wird untersucht, ob es Szenarien gibt, in denen der menschliche Fahrer seinerseits eine überlegene Leistung bei der Kollisionsvermeidung im Vergleich zum Referenzmodell zeigt.

Das ausgewählte Referenzmodell FSM-8.5-mod aus Abschnitt 7.1.1 wird mit dem menschlichen Fahrer als Referenzzustand und der Auswertemethode „Entkopplung bei Risiko“ für jedes Szenario ausgewertet. Von den 42 Kollisionen mit menschlichen Fahrern wurden 26 bzw. 62% durch das Referenzmodell verhindert (vgl. Tabelle 7.13). In 16 Szenarien kollidieren sowohl der menschliche Fahrer als auch das Modell, womit diese Unfälle als unvermeidbar durch das Referenzmodell klassifiziert werden. In sieben

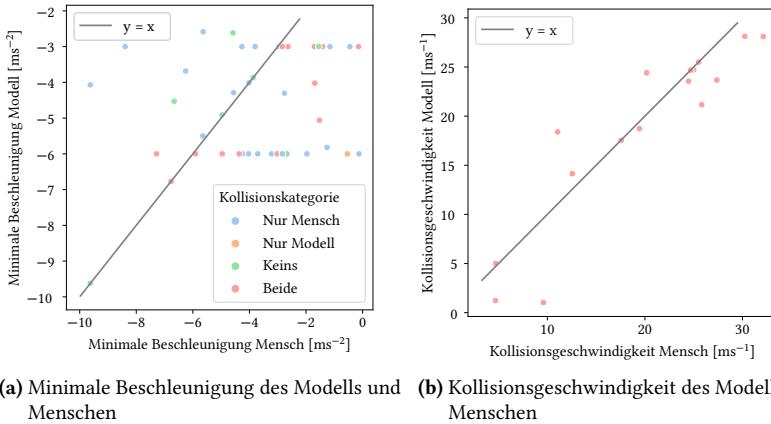
Szenarien kam es sowohl für den menschlichen Fahrer als auch das Modell zu keiner Kollision, womit das Modell die sieben Fälle korrekt als vermeidbar bewertet. In einem Szenario konnte der menschliche Fahrer hingegen eine Kollision verhindern, die das Modell nicht vermeiden konnte, und die am Ende des Abschnitts betrachtet wird.

**Tabelle 7.13:** Kontingenztafel der Kollisionen von menschlichen Fahrern im Vergleich zu den Kollisionen des Referenzmodells

Mensch FSM	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
Keine Kollision	7	26	33
Kollision	1	16	17
$\Sigma$	8	42	50

Zusätzlich wird die Verteilung der minimalen Beschleunigungen des menschlichen Fahrers und des Referenzmodells betrachtet (vgl. Abb. 7.20a), um die Reaktionsintensität zwischen Mensch und Modell zu vergleichen. In Szenarien auf der linken Seite der Winkelhalbierenden zeigt das Modell eine betragsmäßig niedrigere Bremsbeschleunigung. Auffällig ist, dass hier insbesondere Szenarien liegen, in denen das Referenzmodell die menschliche Kollision vermeiden konnte (blau). Dies wird in diesen Szenarien durch eine frühere und vorausschauendere Reaktion des Modells ermöglicht.

Im Gegensatz dazu und insbesondere in Fällen, in denen sowohl Modell als auch menschlicher Fahrer kollidieren (rot), führt das Modell eine stärkere Bremsreaktion aus und erzielt geringere Kollisionsgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 7.20b). Die Punkte auf der unteren rechten Seite der Winkelhalbierenden in Abb. 7.20b stellen die Kollisionsfälle von Modell und Mensch dar, bei denen die Kollisionsgeschwindigkeit des Referenzmodells niedriger ist als die des menschlichen Fahrers. Dies trifft auf 69% der 16 Szenarien zu, womit das Referenzmodell in einer Mehrzahl der Szenarien in der Lage ist, die Unfallschwere zu reduzieren.



(a) Minimale Beschleunigung des Modells und Menschen      (b) Kollisionsgeschwindigkeit des Modells und Menschen

**Abbildung 7.20:** Vergleich der Reaktionsintensität und der Kollisionsgeschwindigkeiten von Referenzmodell und menschlichem Fahrer

Als Letztes wird das eine Szenario betrachtet, in dem der menschliche Fahrer die Kollision gegenüber dem Referenzmodell verhindert. In diesem Szenario reagiert der menschliche Fahrer nicht nur mit einer Bremsreaktion, sondern führt ein laterales Ausweichmanöver aus, um die Kollision zu vermeiden. Für diesen Fall werden die Zeitreihen der lateralen Position und des Längsabstands weiter analysiert (vgl. Abb. 7.21).

Anhand der durchgezogenen Linien für die laterale Position in einem straßenfesten Koordinatensystem lässt sich die seitliche Bewegung des einschrenden Akteurs (grün) erkennen. Als Reaktion auf die laterale Bewegung des einscherenden Akteurs leitet der menschliche Fahrer (blau) bei etwa 10 s ein Ausweichmanöver ein, um die Kollision zu vermeiden. Zu diesem Zeitpunkt ist der Längsabstand zwischen Mensch und Akteur bereits negativ, womit sich beide Fahrzeuge in Längsrichtung überschneiden (blaue gestrichelte Linie). Obwohl das Modell mit der maximalen Beschleunigung von  $6 \text{ m s}^{-1} \text{ s}$  und damit stärker als der menschliche Fahrer (orange gestrichelte Linie) abbremst, kommt es zu einer Kollision zwischen Modell und einscherendem Fahrzeug.

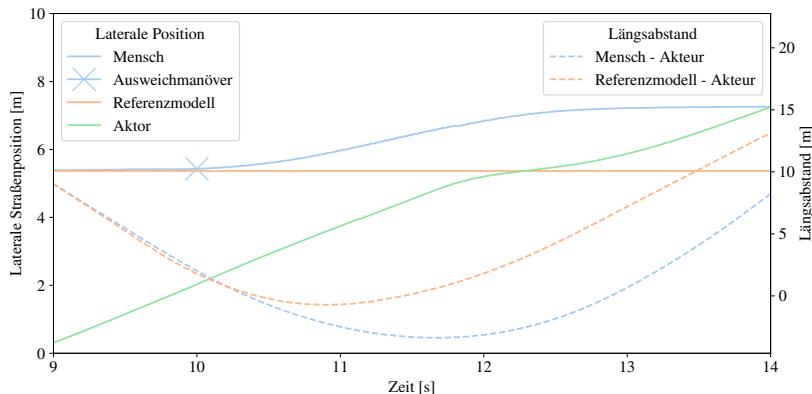


Abbildung 7.21: Beispiel für ein Ausweichmanöver durch den menschlichen Fahrer

Zusammenfassend bestätigt die Auswertung des erweiterten FSM anhand der gewonnen kritischen Realdaten die Auswahl des Referenzmodells als geübter und aufmerksamer menschlicher Fahrer, der 62% der rekonstruierten menschlichen Unfälle vermeiden konnte. Hierbei ist herauszustellen, dass bei der Datenauswahl bereits Unfälle ausgeschlossen wurden, in denen eine Ablenkung oder Beeinträchtigung des menschlichen Fahrers als primärer Auslöser klassifiziert wurde (vgl. Abschnitt 7.2.3.3). Damit repräsentiert die Datengrundlage der Bewertung bereits eine höhere Leistungsfähigkeit gegenüber einem durchschnittlichen menschlichen Fahrer. Als Limitierung des FSM wurde hingegen die fehlende Berücksichtigung von Ausweichmanövern durch den menschlichen Fahrer identifiziert, was zu Kollisionen des Modells in Szenarien führen kann, die für einen menschlichen Fahrer durch ein Ausweichmanöver vermeidbar wären.

### 7.3.2 Anwendung des Modells zur SuT-Bewertung

Im letzten Schritt des Prozesses wird das erweiterte Referenzmodell für den Vergleich zwischen dem menschlichen Fahrer in dem rekonstruierten kritischen Szenario, der simulierten SuT-Reaktion und dem simulierten Referenzmodell angewendet. Als Simulationsumgebung wird die in Abschnitt 7.2.3.2

beschriebene SiL-Umgebung und ein vereinfachtes SAE-Level 4 System eingesetzt.

Zur Demonstration des Prozesses wurde die maximale Bremsbeschleunigung des beispielhaften SuT auf  $b_{SuT,max} = 3 \text{ m s}^{-2}$  limitiert. Damit ist die Bremsbeschleunigung niedriger als die komfortable Längsverzögerung  $b_{ego,comf} = 4 \text{ m s}^{-2}$  und die maximale Längsverzögerung  $b_{ego,max} = 6 \text{ m s}^{-2}$  des Referenzmodells (vgl. Abschnitt 7.1.2).

Die Ergebnisse für den menschlichen Fahrer aus den rekonstruierten kritischen Szenarien sowie das SuT zeigt Tabelle 7.14.

**Tabelle 7.14:** Kontingenztafel der Kollisionen von menschlichen Fahrern im Vergleich zu den Kollisionen des SuT

SuT \ Mensch	Keine Kollision	Kollision	$\Sigma$
Keine Kollision	6	17	23
Kollision	2	25	27
$\Sigma$	8	42	50

In 17 von 42 (40%) der Szenarien konnte das SuT den rekonstruierten menschlichen Unfall verhindern. In 25 Szenarien kam es sowohl für den menschlichen Fahrer als auch das SuT zu einer Kollision. Von den acht kritischen Szenarien ohne Unfallfolgen des menschlichen Fahrers konnte das SuT in sechs Szenarien eine Kollision verhindern. In zwei Szenarien wurde ein Unfall durch ein Ausweichmanöver des menschlichen Fahrers verhindert, während das SuT innerhalb der Spur verzögert hat und es zu einer Kollision kam. In einem der beiden Szenarien konnte das Referenzmodell die Kollision durch die höhere Bremsbeschleunigung gegenüber dem beispielhaften SuT verhindern (vgl. Tabelle 7.13). Somit konnte das SuT insgesamt 15 Kollisionen gegenüber dem menschlichen Fahrer in den 50 kritischen Szenarien verhindern.

Damit übertrifft die Leistungsfähigkeit des untersuchten SuT, bezogen auf die Kollisionsvermeidung, den menschlichen Fahrer in den rekonstruierten Unfällen. Hierbei wurden bereits Unfälle mit Ablenkung oder Beeinträchtigung des Fahrers als primärer Auslöser ausgeschlossen (vgl. Abschnitt 7.2.3.3), was

der Auswahl eines geübten und aufmerksamen Fahrers in Abgrenzung zu einem durchschnittlichen Fahrer folgt (vgl. Abschnitt 7.1.1).

Im Vergleich zum SuT konnte das Referenzmodell insgesamt 25 Kollisionen gegenüber dem menschlichen Fahrer vermeiden (vgl. Tabelle 7.13). Betrachtet man das in Abschnitt 7.1.2 definierte Akzeptanzkriterium S7.1.2, erfüllt das beispielhafte SuT die geforderte Performance in Bezug auf die Kollisionsvermeidung im Vergleich zum FSM nicht. Somit übertrifft das SuT zwar die Leistung der menschlichen Fahrer in den rekonstruierten Unfällen, erreicht jedoch noch nicht die geforderte Leistungsfähigkeit des Referenzmodells. Dies ist aufgrund der zur Demonstration des Prozesses reduzierten Bremsbeschleunigung des SuT gegenüber dem Referenzmodell zu erwarten. Im Rahmen der Produktentwicklung müsste das beispielhafte SuT in Bezug auf die Kollisionsvermeidung weiterentwickelt werden, um im Rahmen der Freigabeargumentation das geforderte Akzeptanzkriterium zur Argumentation der szenarienbasierten Abwesenheit eines unangemessenen Risikos zu erfüllen.

## 7.4 Zusammenfassung und Fazit

Der zweite Anwendungsfall präsentiert eine praktische Implementierung des in Abschnitt 5.1 vorgeschlagenen Prozesses und fokussiert sich auf die Performance von Nutzfahrzeugen nach SAE-Level 4 zur Unfallvermeidung in kritischen Szenarien.

Zuerst wird ein Akzeptanzkriterium für das szenarienbasierte Verhalten hochautomatisierter Nutzfahrzeuge basierend auf einem geübten und aufmerksamen Fahrer definiert (Prozessschritt 1). Hierzu wird das FSM aus UN-Regelung Nr. 157 als Referenzmodell ausgewählt und ein Evaluierungskonzept zur Anwendbarkeit des Modells auf realen Daten vorgeschlagen. Zusätzlich werden eine erweiterte CFS-Metrik und ein lateraler TTC-Schwellenwert eingeführt, um die Performance des Modells in Einscherszenarien mit gleichzeitiger Abbremsung des einscherenden Fahrzeugs zu verbessern und die Falsch-Positiv-Rate des Modells zu reduzieren (vgl. Nachweis S7.1.1.2).

Ausgehend von der Herausforderung des distanzbasierten Testens bei der Sammlung von kritischen Realdaten wurden Dashcam-Aufnahmen aus kommerziellen Nutzfahrzeugflotten als vielversprechende Datenquelle identifiziert (Prozessschritt 2). Mit einer jährlichen Laufleistung von, je nach Anbieter, mehreren Milliarden Kilometern, ermöglicht die Event-getriggerte Aufzeichnung eine gezielte und skalierbare Aufzeichnung kritischer Szenarien innerhalb einer definierten ODD. Im Rahmen der Dissertation wurde ein Datensatz aus rekonstruierten kritischen Simulationsszenarien mit 147 Unfällen und 51 Beinahe-Unfällen erstellt. Basierend auf einer statistischen Abschätzung anhand der Unfallrate von Nutzfahrzeugen der Klasse 8 auf US-Autobahnen, entspricht der gesammelte Datensatz einer zugrunde liegenden Fahrleistung der Nutzfahrzeugflotten von 240 Millionen Kilometern (vgl. Nachweis S7.2.3).

Im letzten Schritt werden die vorgeschlagenen Erweiterungen des FSM evaluiert und zur Bewertung des SuT-Systemverhaltens in den gesammelten kritischen Szenarien angewandt (Prozessschritt 3). Das erweiterte Modell FSM-8.5-mod erreicht in den drei ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [177] die gleiche Performance wie das ursprüngliche FSM. Im über die ALKS-Regelung hinausgehenden kombinierten Einscher- und Bremszenario erreicht das Modell eine Reduzierung der Kollisionen um 25,9%. Mit der Einführung des lateralen TTC-Schwellenwerts  $TTC_{th} = 8.5$  s wird zugleich die als „übervorsichtig“ [194] kritisierte hohe Sensitivität des FSM reduziert. Anhand der Auswertung des highD-Datensatzes ergibt sich eine Reduzierung der Falsch-Positiv-Rate um 87,4%.

Abschließend wird erstmals eine Validierung des erweiterten FSM anhand rekonstruierter Unfalldaten durchgeführt. Basierend auf der Simulation von 42 der gesammelten Kollisionen konnte das erweiterte FSM 62% der rekonstruierten menschlichen Unfälle vermeiden und bestätigt die Modellierung der Kollisionsvermeidung basierend auf einem geübten und aufmerksamen Fahrer. Als Limitierung des Modells wurde hingegen die fehlende Berücksichtigung von Ausweichmanövern im Referenzmodell identifiziert. Der Vergleich mit einem beispielhaften SuT zeigt, wie das Referenzmodell für die Entwicklung und Freigabeargumentation eingesetzt werden kann.

Zu den Einschränkungen des Anwendungsbeispiels zählt, dass keine vollständige Betrachtung der Verteilung der Fahrer in den gesammelten kritischen Szenarien durchgeführt wurde. Szenarien mit Ablenkung oder Beeinträchtigung des menschlichen Fahrers wurden bei der Datenauswahl ausgeschlossen, um der Definition eines geübten und aufmerksamen menschlichen Fahrers zu entsprechen. Mit den gesammelten rekonstruierten Szenarien ist jedoch keine Aussage möglich über die Altersverteilung und Erfahrung der LKW-Fahrer sowie den positiven Effekt von Fahrerschulungen basierend auf den Dashcam-Systemen. Als weitere Limitierung gelten Ungenauigkeiten in der verwendeten SiL-Simulation, da insbesondere die Validierung der verwendeten Sensor- und Fahrdynamikmodelle nicht Teil der Dissertation ist.

Ein Fokus zukünftiger Forschungsarbeiten sollte auf der Erweiterung bestehender Referenzmodelle für vielfältigere Szenariendefinitionen sowie der datenbasierten Validierung der Modelle liegen, die als Grundlage für Zulassungsvorschriften von Systemen mit SAE-Level 4 dienen können.

# 8 Zusammenfassung und Ausblick

## 8.1 Zusammenfassung

Den Stand der Technik für die Freigabe automatisierter Fahrzeuge stellt das szenarienbasierte Testen dar. Die strukturierte Beschreibung der ODD mit einer Szenariendatenbank ermöglicht die Ableitung von Testfällen, die auf verschiedenen XIL-Plattformen oder dem Prüfgelände ausgeführt werden können. Eine zentrale Herausforderung ist die Definition von Akzeptanzkriterien für die notwendige Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen in diesen Szenarien im Vergleich zum menschlichen Fahrer. Zur Erfüllung von ISO 21448 ist der Nachweis notwendig, dass ein automatisiertes Fahrzeug basierend auf gesellschaftlich moralischen Konzepten kein unangemessenes Risiko darstellt. Bisherige Ansätze für Akzeptanzkriterien können in die Bewertung von aggregiertem Verhalten (z. B. als positive Risikobilanz bezogen auf eine menschliche Unfallrate) und szenarienbasiertem Verhalten (z. B. im Vergleich zu einem Simulationsmodell) unterteilt werden und sind Gegenstand aktueller Diskussion in Forschung, Industrie und Gesellschaft. Die drei hieraus abgeleiteten Forschungsfragen werden nachfolgend final diskutiert (vgl. Abschnitt 1.3).

Zentraler Bestandteil der Dissertation ist der entwickelte dreistufige Prozess (vgl. Kapitel 5) zur Definition und Anwendung von Akzeptanzkriterien im Vergleich zum menschlichen Fahrer als Beitrag zur Freigabeargumentation (**Forschungsfrage 1**). Die Schritte und Artefakte des Prozesses erweitern die im VVM-Projekt als GSN entwickelte Sicherheitsargumentation und ermöglichen eine strukturierte und nachverfolgbare Freigabeargumentation in Einklang mit dem szenarienbasierten Testansatz. Im ersten Prozessschritt werden

explizit Akzeptanzkriterien für aggregiertes und szenarienbasiertes Verhalten definiert, deren Kombination für den vollständigen Nachweis der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos im Vergleich zu einem menschlichen Referenzfahrer notwendig ist. Als Referenz für das zulässige Risiko dient das Konzept eines geübten und aufmerksamen menschlichen Fahrers, dessen Leistungsfähigkeit als Akzeptanzkriterium zur Bewertung des Systemverhaltens in durchgeführten Testfällen festgelegt wird.

**Forschungsfrage 2** evaluiert, wie Realdaten als Grundlage der Definition von Akzeptanzkriterien gewonnen werden können. Hierzu werden im zweiten Prozessschritt die ODD des SuT, die betrachteten Szenarien und Anforderungen zur Auswahl geeigneter Datenquellen definiert. Die Einordnung gesamter Realdaten in die szenarienbasierte Struktur der Sicherheitsargumentation erfolgt durch die Anwendung der Methode der Szenarienidentifikation. Hieraus werden identifizierte Szenarienparameter für den Vergleich des aggregierten Verhaltens oder ausführbare Simulationsszenarien für die szenarienbasierte Evaluierung des SuT extrahiert.

Für die Sicherstellung der korrekten Anwendung von Akzeptanzkriterien bei der Bewertung des Systemverhaltens (**Forschungsfrage 3**) werden die Akzeptanzkriterien im dritten Prozessschritt im Rahmen des strukturierten szenarienbasierten Testansatzes eingesetzt. Das SuT wird in geeigneten Testumgebungen mit den als szenarienbasiertem Modell formulierten Akzeptanzkriterien verglichen, wobei simulationsbasierte Methoden eine skalierbare Testdurchführung ermöglichen. Die Ergebnisse werden abschließend als Teil des Nachweises für die Abwesenheit eines unangemessenen Risikos in der GSN dokumentiert.

Die Anwendbarkeit des Prozesses wird anhand von zwei Anwendungsfällen im Umfeld der Absicherung von hochautomatisierten Nutzfahrzeugen nach SAE-Level 4 untersucht.

Im ersten Anwendungsfall (vgl. Kapitel 6) werden Akzeptanzkriterien für das aggregierte Verhalten im Vergleich zu einem menschlichen Sicherheitsfahrer als Referenz für ein kompetentes Fahrverhalten definiert und in der GSN eingeordnet (F1). Gesammelte reale Fahrdaten für das SuT und menschliche

Sicherheitsfahrer sowie ein Dronendatensatz zur Ableitung eines durchschnittlichen Fahrers werden mit einer Szenarienidentifikation verglichen (F2). Die Anwendung der Akzeptanzkriterien erfolgt durch den Vergleich der Ähnlichkeit des Verhaltens anhand von auf die drei Datensätze kalibrierten Fahrzeugfolgemodellen (F3).

Im zweiten Anwendungsfall (vgl. Kapitel 7) wird ein szenarienbasiertes Akzeptanzkriterium für die Bewertung von vermeidbaren Unfällen entwickelt und in der GSN eingeordnet (F1). Aufgrund der speziellen Herausforderung der niedrigen Auftretensrate von Unfällen in Realdaten wurden reale menschliche Unfälle aus einem Datensatz von kommerziellen Flottenüberwachungssystemen rekonstruiert (F2). Als Akzeptanzkriterium für vermeidbare Unfälle wird das FSM aus UN-Regelung Nr. 157 erweitert und erstmals für reale Unfalldaten angewendet (F3).

## 8.2 Wissenschaftlicher Beitrag

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein neuer Prozess zur Definition von Akzeptanzkriterien für die Freigabe hochautomatisierter Nutzfahrzeuge im Vergleich zum menschlichen Fahrer entwickelt. Der Prozess berücksichtigt sowohl aggregierte als auch szenarienbasierte Akzeptanzkriterien und erweitert die VVM-Sicherheitsargumentation. Die drei Prozessschritte sowie die beiden Anwendungsfälle zeigen exemplarisch, wie die Kombination aus szenarienbasiertem Testprozess und einer strukturierten Sicherheitsargumentation als GSN zur Argumentation der Abwesenheit eines unangemessenen Risikos eingesetzt werden kann. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur Schaffung von Akzeptanz und Vertrauen in die Sicherheit hochautomatisierter Fahrzeuge.

Als Teil dieser Diskussion wurde im ersten Anwendungsfall untersucht, wie ein Referenzfahrer für einen geübten und aufmerksamen menschlichen Fahrer nicht nur für kritische Szenarien und die Unfallvermeidung, sondern auch für alltägliche Szenarien und die Erwartung eines vorhersehbaren und verantwortungsvollen Verhaltens automatisierter Fahrzeuge definiert werden kann.

Hierfür wurde die Verwendung von speziell geschulten und von einem Sicherheitsleiter als Beifahrer unterstützten Sicherheitsfahrern als aggregiertes Akzeptanzkriterium für kompetentes Fahrverhalten in alltäglichen Fahrsituationen vorgeschlagen und evaluiert.

Als szenarienbasiertes Akzeptanzkriterium für die Unfallvermeidung wurde das FSM aus UN-Regelung Nr. 157 um eine verbesserte CFS-Metrik zur Berücksichtigung des Bremsverhaltens von einscherenden Fahrzeugen und um einen lateralen TTC-Schwellenwert zur Reduzierung der Modellsensitivität erweitert. Für das eingeführte kombinierte Einscher- und Bremsszenario ergibt sich eine Reduzierung von Kollisionen um 25,9% gegenüber dem ursprünglichen FSM. Gleichzeitig wird eine Reduzierung der falsch-positiven Bremsreaktionen des Modells um 87,4% im highD-Datensatz erzielt.

Außerdem wurde das Potential von rekonstruierten kritischen Szenarien aus Flottenüberwachungssystemen für die Sammlung von kritischen Szenarien gezeigt. Aufgrund der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit ist dies mit anderen Datenquellen nur mit erheblich höherem Aufwand erzielbar. Im Rahmen der Dissertation wurde ein Datensatz aus 198 rekonstruierten kritischen Szenarien mit 147 Unfällen und 51 Beinahe-Unfällen gewonnen, dem eine geschätzte Fahrleistung von 240 Millionen Kilometern zugrunde liegt. Aufgrund der jährlichen Laufleistungen der mit den Überwachungssystemen ausgestatteten Nutzfahrzeugflotten von mehreren Milliarden Kilometern pro Jahr wurde gezeigt, dass der vorgestellte Prozessteil einen skalierbaren Ansatz zur Sammlung von kritischen Realdaten und zur Reduzierung von unbekannten Szenarien gemäß ISO 21448 darstellt.

Ausgehend von 42 der rekonstruierten menschlichen Unfälle, die im Anwendungsbereich des FSM liegen, wurde erstmals eine Validierung des Modells basierend auf realen rekonstruierten Unfalldaten durchgeführt. Das erweiterte FSM konnte 62% der rekonstruierten menschlichen Unfälle vermeiden und bestätigt die Modellierung basierend auf einem geübten und aufmerksamen menschlichen Fahrer.

## 8.3 Ausblick

Während im Rahmen der Dissertation Daten aus dem Realtest sowie der SiL-Simulation verwendet wurden, besteht weiterer Forschungsbedarf für die durchgängige Testorchestrierung auf verschiedene Testplattformen wie HiL-Umgebungen und das Prüfgelände. Im vorgestellten Prozess nicht betrachtet wurde die Validierung der eingesetzten Simulationsumgebung sowie Sensor- und Fahrdynamikmodelle (vgl. Abschnitt 5.6). Beide Schritte können zukünftig als zusätzlicher Teil der GSN berücksichtigt werden.

Als Limitierung des ersten Anwendungsfalls (vgl. Kapitel 6) gilt, dass im verwendeten Akzeptanzkriterium nur Effekte untersucht werden können, die auch das eingesetzte IDM-Fahrermodell abbildet. Weil das IDM nur das Verhalten des führenden Fahrzeugs einbezieht, wurde eine Reaktion auf Fahrzeuge auf benachbarten Fahrspuren oder bei unterschiedlichen Wetterbedingungen nicht berücksichtigt.

In zukünftigen Forschungsarbeiten kann der Prozess für weitere Szenarien und die Entwicklung detaillierter Fahrermodelle angewandt werden. Von zentralem Interesse ist auch die Definition neuer Akzeptanzkriterien, mit denen Erwartungen anderer Verkehrsteilnehmer an das Fahrverhalten eines automatisierten Fahrzeugs mit dem Ziel breiter gesellschaftlicher Akzeptanz ausgedrückt werden können. Soll der Prozess auf Akzeptanzkriterien für aggregiertes Verhalten im Rahmen einer kommerziellen Anwendung eingesetzt werden, sind gegenüber der gezeigten prototypischen Implementierung umfangreichere Datensätze einschließlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten erforderlich. Ebenso kann der Ansatz erweitert und als Onboard-Überwachung während der Straßenerprobung eingesetzt werden.

Im zweiten Anwendungsfall (vgl. Kapitel 7) wurde gezeigt, dass kritische Realdaten aus Flottenüberwachungssystemen zur gezielten Datensammlung in Randbereichen des Parameterraums und zur Reduzierung von unbekannten Szenarien eingesetzt werden können (vgl. Abschnitt 7.2.3.3). Die statistische Kombination von Parameterverteilungen aus verschiedenen Datenquellen bietet hier weiteres Potenzial, eine genauere Beschreibung der Randbereiche

zu ermöglichen. Damit ist eine Reduzierung der Unsicherheit bestehender Methoden zur Risikoschätzung erreichbar, ohne dass eine deutliche Erhöhung von Realtestumfängen notwendig wird.

Bei der Validierung des FSM mit den gesammelten Unfalldaten wurde ein kritisches Szenario identifiziert, in dem der menschliche Fahrer durch ein Ausweichmanöver einen Unfall gegenüber dem Referenzmodell verhindern konnte (vgl. Abschnitt 7.3.1.3). Während die Möglichkeit von Ausweichmanövern bereits in UN-Regelung Nr. 157 vorgesehen ist, unterstützen die aktuellen Referenzmodelle dieses Verhalten nicht [176]. Darüber hinaus sind weitere Fahrversuche oder eine Simulatorstudie notwendig für die experimentelle Bestimmung der aufgeteilten Reaktionszeiten im Rahmen des vorgeschlagenen Reaktionsmodells für mehrere Akteure (vgl. Abschnitt 7.1.2).

Während das untersuchte FSM für die Typgenehmigung von Fahrzeugen nach SAE-Level 3 relevant ist, existieren aktuell keine Vorgaben für Referenzmodelle für Fahrzeuge nach SAE-Level 4 und 5. Die Limitierungen der Referenzmodelle in UN-Regelung Nr. 157 zeigen, dass eine umfangreiche Validierung der für die Typgenehmigung vorgeschriebenen Modelle mit realen Fahrdaten durchgeführt werden sollte. Hierzu zählt die Berücksichtigung von kritischen Szenarien inklusive Unfalldaten sowie die Evaluierung der Modelle für detaillierte und realistische Szenariodefinitionen.

Um zukünftig die gesamte ODD von Fahrzeugen nach SAE-Level 4 und 5 abzudecken, muss eine zunehmende Anzahl an Szenarien inklusive urbanem Verkehr abgedeckt werden. Beispiele sind höhere Anforderungen an kooperatives Fahrverhalten in Kreuzungsszenarien, besondere Vorsicht gegenüber Fußgängern und Radfahrern sowie die vorausschauende Reaktion auf Einsatzfahrzeuge. Für die korrekte Interaktion mit der Umgebung müssen Referenzmodelle außerdem Kartenelemente wie bspw. Fahrspuren, Verkehrsschilder und Seitenstreifen in Betracht ziehen, die in den aktuellen Referenzmodellen in UN-Regelung Nr. 157 nicht berücksichtigt werden.

# Literatur

- [1] A. Herrmann, W. Brenner und R. Stadler, *Autonomous Driving: How the Driverless Revolution Will Change the World*. Emerald Group Publishing: Bingley: emerald publishing, 2018.
- [2] Federal Motor Carrier Safety Administration, *Persons Killed in Crashes Involving Large Trucks, 2016-2018*, 2018. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.fmcsa.dot.gov/safety/data-and-statistics/large-truck-and-bus-crash-facts-2018>.
- [3] American Trucking Associations, *Economics and Industry Data*, 2021. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.trucking.org/economics-and-industry-data>.
- [4] The American Transportation Research Institute, *Critical Issues in the Trucking Industry - 2020*, 2020. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://truckingresearch.org/2020/10/critical-issues-in-the-trucking-industry-2020/>.
- [5] SAE INTERNATIONAL, „J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles“, 2021.
- [6] M. Hejase, M. Barbier, U. Ozguner, J. Ibanez-Guzman und T. Acarman, „A Validation Methodology for the Minimization of Unknown Unknowns in Autonomous Vehicle Systems,“ *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 114–119, 2020.
- [7] W. Wachenfeld und H. Winner, *Die Freigabe des autonomen Fahrens*. Berlin: Springer Vieweg, 2015, S. 439–464.
- [8] E. Sax, *Automatisiertes Testen Eingebetteter Systeme in der Automobilindustrie*. München: Carl Hanser Verlag, 2008.

- [9] A. Pütz, A. Zlocki, J. Bock und L. Eckstein, „System validation of highly automated vehicles with a database of relevant traffic scenarios,“ in *12th ITS European Congress*, 2017.
- [10] M. Rasch, P. T. Ubben, T. Most, V. Bayer und R. Niemeier, „Safety Assessment and Uncertainty Quantification of Automated Driver Assistance Systems using Stochastic Analysis Methods,“ in *NAFEMS World Congress 2019*, 2019.
- [11] F. Schmidt, „Funktionale Absicherung kamerabasierter Aktiver Fahrerassistenzsysteme durch Hardware-in-the-Loop-Tests,“ Kaiserslautern: Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2012.
- [12] R. Matthaei, A. Reschka, J. Rieken, F. Dierkes, S. Ulbrich, T. Winkle und M. Maurer, „Autonomes Fahren,“ in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 1139–1165.
- [13] C. S. Sippl, „Identifikation relevanter Verkehrssituationen für die szenarienbasierte Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen,“ Erlangen-Nürnberg: Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität, 2020.
- [14] A. Knapp, M. Neumann, M. Brockmann, R. Walz und T. Winkle, *RESPONSE 3 - Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS*, 2009. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: [https://www.acea.auto/uploads/publications/20090831\\_Code\\_of\\_Practice\\_ADAS.pdf](https://www.acea.auto/uploads/publications/20090831_Code_of_Practice_ADAS.pdf).
- [15] A. Bartels, M. Rohlfs, S. Hamel, F. Saust und L. K. Klauske, „Querführungsassistenz,“ in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 937–957.
- [16] J. Bach, „Methoden und Ansätze für die Entwicklung und den Test prädiktiver Fahrzeugregelungsfunktionen,“ Karlsruhe: Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2018.

- [17] SAE INTERNATIONAL, „J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles,“ 2014.
- [18] SAE INTERNATIONAL, „J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles,“ 2018.
- [19] U. N. E. C. for Europe (UNECE), „Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems,“ *Addendum 156 to the 1958 Agreement - UN Regulation No. 157*, 2020.
- [20] Mercedes-Benz Group AG, *Erste international gültige Systemgenehmigung für hochautomatisiertes Fahren*, 2021. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/produktinnovation/autonomes-fahren/systemgenehmigung-fuer-hochautomatisiertes-fahren.html>.
- [21] National Highway Traffic Safety Administration, *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*, 2013.
- [22] T. M. Gasser u. a., „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung,“ *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Fahrzeugtechnik Heft F*, Jg. 83, 2012.
- [23] Verband der Automobilindustrie e.V., „Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren,“ *VDA Magazin - Automatisierung*, 2015.
- [24] T. Binder, D. Winkler und S. Biffl, „Quo Vadis V-Modell,“ 2006.
- [25] I. O. for Standardization, *Road vehicles - Functional safety*. ISO 26262, 2018.
- [26] VDA QMC Working Group 13 / Automotive SIG, „Automotive SPICE - Process Reference Model, Process Assessment Model,“ 2017.
- [27] D. Angermeier u. a., *V-Modell XT - Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte. Version 2.3*, 2019. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://weit-verein.de>.

- [28] R. Pfeffer, „Szenariobasierte simulationsgestützte funktionale Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen durch Nutzung von Realdaten,“ Karlsruhe: Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2020.
- [29] R. Pfeffer, G. N. Basedow, N. R. Thiesen, M. Spadinger, A. Albers und E. Sax, „Automated driving-challenges for the automotive industry in product development with focus on process models and organizational structure,“ *SysCon 2019 - 13th Annual IEEE International Systems Conference, Proceedings*, 2019.
- [30] F. Schultdt, „Ein Beitrag für methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen,“ Braunschweig: Dissertation, TU Braunschweig, 2017.
- [31] S. Hakuli und M. Krug, „Virtuelle Integration,“ in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 125–138.
- [32] T. Zurakawa, J. Schäuffele und R. Carey, *Automotive Software Engineering*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [33] Der Beauftragte der Bundesregierung für Informationstechnik, *V-Modell XT - Häufig gestellte Fragen zum V-Modell XT*, 2016. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: [https://www.cio.bund.de/Webs/CIO/DE/digitaler-wandel/Achitekturen\\_und\\_Standards/V\\_modell\\_xt/v\\_modell\\_xt-artikel.html](https://www.cio.bund.de/Webs/CIO/DE/digitaler-wandel/Achitekturen_und_Standards/V_modell_xt/v_modell_xt-artikel.html).
- [34] U. Dombrowski und T. Mielke, „Gestaltungsprinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme,“ in *Ganzheitliche Produktionssysteme: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*, U. Dombrowski und T. Mielke, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 25–169.
- [35] R. Wagner, *Projektmanagement in der Automobilindustrie: Herausforderungen und Erfolgsfaktoren*. Springer-Verlag, 2015.

- 
- [36] K. Beck, M. Beedle, A. van Bennekum, A. Cockburn, W. Cunningham und M. Fowler, *Manifest für Agile Softwareentwicklung*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://agilemanifesto.org/iso/de manifesto.html>.
  - [37] Scrum.org, *What is Scrum? A Better Way Of Building Products*, 2020. Adresse: <https://www.scrum.org/resources/what-is-scrum>.
  - [38] Scaled Agile Inc., *SAFe 5 for Lean Enterprises*, 2022. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.scaledagileframework.com/>.
  - [39] R. G. Cooper, „Perspective: The Stage-Gate Idea-to-Launch Process-Update, What’s New and NexGen Systems,“ S. 213–232, 2008.
  - [40] K. Sattler, „Methodik für den Systemtest in der integralen Fahrzeugsicherheit,“ Magdeburg: Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2015.
  - [41] J. Schäuffele und T. Zurawka, *Automotive Software Engineering - Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen*. 6. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016.
  - [42] „Systems and software engineering - Vocabulary,“ ISO/IEC/IEEE 24765:2010(E), 2010.
  - [43] L. Westhofen, C. Neurohr, T. Koopmann, M. Butz, B. Schütt, F. Utesch, B. Neurohr, C. Gutenkunst und E. Böde, *Criticality Metrics for Automated Driving: A Review and Suitability Analysis of the State of the Art*. Springer Netherlands, 2022. arXiv: 2108.02403. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09788-7>.
  - [44] V. Schönemann, H. Winner, T. Glock, S. Otten, E. Sax, B. Boeddeker, G. Verhaeg, F. Tronci und G. G. Padilla, „Scenario-Based Functional Safety for Automated Driving on the Example of Valet Parking,“ in *Advances in Information and Communication Networks*, K. Arai, S. Kapoor und R. Bhatia, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 53–64.
  - [45] International Organization for Standardization, *Road vehicles - Safety of the intended functionality*. ISO 21448, 2022.

- [46] International Organization for Standardization, *Road vehicles - Safety of the intended functionality*. ISO PAS 21448, 2019.
- [47] C. King, T. Braun, C. Braess, J. Langner und E. Sax, „Capturing the Variety of Urban Logical Scenarios from Bird-view Trajectories,“ *VEHITS*, S. 471–480, 2021.
- [48] J. E. Stellet, T. Brade, A. Poddey, S. Jesenski und W. Branz, „Formalisation and algorithmic approach to the automated driving validation problem,“ *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 45–51, 2019.
- [49] S. Jesenski, J. E. Stellet, W. Branz und J. M. Zöllner, „Simulation-Based Methods for Validation of Automated Driving: A Model-Based Analysis and an Overview about Methods for Implementation,“ *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*, S. 1914–1921, 2019.
- [50] M. Blumenthal, L. Fraade-Blanar, R. Best und J. Irwin, *Safe Enough: Approaches to Assessing Acceptable Safety for Automated Vehicles*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2020. Adresse: [https://www.rand.org/pubs/research%7B%5C\\_%7Dreports/RRA569-1.html..](https://www.rand.org/pubs/research%7B%5C_%7Dreports/RRA569-1.html..)
- [51] F. Favarò, L. Fraade-Blanar, S. Schnelle, T. Victor, M. Peña, J. Engstrom, J. Scanlon, K. Kusano und D. Smith, „Building a Credible Case for Safety: Waymo’s Approach for the Determination of Absence of Unreasonable Risk,“ 2023. Adresse: <https://arxiv.org/abs/2306.01917>.
- [52] M. Maurer, „Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen,“ in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, Hrsg. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 43–54.
- [53] M. Feilhauer, „Simulationsgestützte Absicherung von Fahrerassistenzsystemen,“ Stuttgart: Dissertation, Universität Stuttgart, 2018.
- [54] T. Ponn, F. Diermeyer und C. Gnandt, „An optimization-based method to identify relevant scenarios for type approval of automated

- vehicles,“ in *Proceedings of the ESV - International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Eindhoven, Niederlande, 2019, S. 10–13.
- [55] R. A. Brooks, „A Robust Layered Control System For A Mobile Robot,“ *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Jg. 2, Nr. 1, S. 14–23, 1986.
- [56] U. Eberle, *From PEGASUS to VVM - Where do we come from and why the PEGASUS Journey has not yet reached its Final Destination*, 2022. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: [https://www.vvm-projekt.de/fileadmin/user\\_upload/Mid-Term/Presentations/VVM\\_HZE\\_MS2\\_20220315\\_WhereDoWeComeFrom.pdf](https://www.vvm-projekt.de/fileadmin/user_upload/Mid-Term/Presentations/VVM_HZE_MS2_20220315_WhereDoWeComeFrom.pdf).
- [57] dSPACE GmbH, *Release Tests for Camera- and Radar-Based Applications Using Closed-Loop HIL System*, 2022. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: [https://www.dspace.com/en/pub/home/applicationfields/portfolio/driver\\_assistance\\_systems/hil\\_simulation/hil\\_testing\\_camera\\_and\\_radar.cfm](https://www.dspace.com/en/pub/home/applicationfields/portfolio/driver_assistance_systems/hil_simulation/hil_testing_camera_and_radar.cfm).
- [58] P. Reinold, N. Meyer, C. Sommer, F. Dressler, M. Eisenbarth und J. Andert, „Verkehrssimulation im Hardware-in-the-Loop-Steuergerätetest,“ in *Simulation und Test 2018*, S. Vieweg, Hrsg., Wiesbaden, 2019, S. 253–269.
- [59] Mercedes-Benz AG, *Virtuelle Fahrt in die Zukunft. Fahrimulator von Mercedes-Benz*, 2020. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/produktinnovation/technologie/fahrsimulator.html>.
- [60] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), *PEGASUS-Projekt*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <http://www.pegasus-projekt.info/de/>.
- [61] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), *PEGASUS Method - An Overview*, 2019. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/Pegasus-Abschlussveranstaltung/PEGASUS-Gesamtmethode.pdf>.

- [62] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt und M. Maurer, „Definition der Begriffe Szene , Situation und Szenario für das automatisierte Fahren,“ *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme 2015*, S. 105–117, 2015.
- [63] E. de Gelder, J. P. Paardekooper, A. Khabbaz Saberi, H. Elrofai, O. op den Camp, S. Kraines, J. Ploeg und B. De Schutter, „Towards an Ontology for Scenario Definition for the Assessment of Automated Vehicles: An Object-Oriented Framework,“ *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, S. 1–16, 2022.
- [64] S. Geyer u. a., „Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance,“ *Intelligent Transport Systems, IET*, Jg. 8, S. 183–189, 2014.
- [65] A. Reschka, „Fertigkeiten- und Fähigkeitengraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung,“ Braunschweig: Dissertation, TU Braunschweig, 2017.
- [66] G. Bagschik, T. Menzel, A. Reschka und M. Maurer, „Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen,“ *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*, 2017.
- [67] C. Neurohr, L. Westhofen, M. Butz, M. H. Bollmann, U. Eberle und R. Galbas, „Criticality Analysis for the Verification and Validation of Automated Vehicles,“ *IEEE Access*, Nr. 9, S. 18 016–18 041, 2021.
- [68] ASAM, „ASAM OpenSCENARIO DSL,“ Diss., 2024. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.asam.net/standards/detail/openscenario-dsl/>.
- [69] Foretellix Ltd., *M-SDL Specification*, 2021. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.foretellix.com/open-language/>.
- [70] ASAM, *ASAM OpenSCENARIO XML*, 2024. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.asam.net/standards/detail/openscenario-xml/>.

- 
- [71] ASAM, *ASAM OpenDRIVE*, 2024. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/>.
  - [72] F. Bock, C. Sippl, A. Heinzz, C. Lauerz und R. German, „Advantageous usage of textual domain-specific languages for scenario-driven development of automated driving functions,“ *SysCon 2019 - 13th Annual IEEE International Systems Conference, Proceedings*, 2019.
  - [73] G. Bagschik, T. Menzel und M. Maurer, „Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles,“ in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, Bd. June 2018, Changshu, China: IEEE, 2018, S. 1813–1820.
  - [74] G. Bagschik, T. Menzel, C. Körner und M. Maurer, „Wissensbasierte Szenariengenerierung für Betriebsszenarien auf deutschen Autobahnen,“ in *12. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*, Walting, Germany: Uni-DAS e.V., 2018, S. 1–14.
  - [75] J. Bock, R. Krajewski, L. Eckstein, J. Klimke, J. Sauerbier und A. Złocki, „Data basis for scenario-based validation of HAD on highways,“ in *27th Aachen colloquium automobile and engine technology*, 2018, S. 8–10.
  - [76] M. Scholtes u. a., „6-Layer Model for a Structured Description and Categorization of Urban Traffic and Environment,“ *IEEE Access*, Jg. 9, S. 59 131–59 147, 2021.
  - [77] H. Weber u. a., „A framework for definition of logical scenarios for safety assurance of automated driving,“ *Traffic Injury Prevention*, Jg. 20, S. 65–70, 2019.
  - [78] IKA - RWTH Aachen, *The OMEGA Format - A Comprehensive Open-Source Measurement Data Format*, 2021. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: [https://github.com/ika-rwth-aachen/omega\\_format](https://github.com/ika-rwth-aachen/omega_format).
  - [79] M. Bollmann, *Criticality Metrics : Introduction and their Use in Practice*, 2022. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: [https://www.vvm-projekt.de/fileadmin/user\\_upload/Mid-Term/Presentations/VVM\\_HZE\\_S1\\_P3b\\_20220315\\_CriticalityMetrics.pdf](https://www.vvm-projekt.de/fileadmin/user_upload/Mid-Term/Presentations/VVM_HZE_S1_P3b_20220315_CriticalityMetrics.pdf).

- [80] P. Schneider, M. Butz, C. Heinzemann, J. Oehlerking und M. Woehrle, „Towards threat metric evaluation in complex urban scenarios,“ *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, S. 1192–1198, 2021.
- [81] F. M. Reisgys, „Glaubwürdigkeit und Einsatz des szenariobasierten X-in-the-Loop-Tests für Fahrerassistenzsysteme,“ 2023.
- [82] C. Neurohr, L. Westhofen, T. Henning, T. De Graaff, E. Mohlmann und E. Bode, „Fundamental Considerations around Scenario-Based Testing for Automated Driving,“ *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, Nr. Iv, S. 121–127, 2020. arXiv: 2005.04045.
- [83] A. Tenbrock, A. Konig, T. Keutgens und H. Weber, „The ConScenD Dataset: Concrete Scenarios from the highD Dataset According to ALKS Regulation UNECE R157 in OpenX,“ *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops)*, S. 174–181, 2021. arXiv: 2103.09772. Adresse: <http://arxiv.org/abs/2103.09772>.
- [84] R. Krajewski, J. Bock, L. Kloeker und L. Eckstein, „The highD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Vehicle Trajectories on German Highways for Validation of Highly Automated Driving Systems,“ *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, S. 2118–2125, 2018. Adresse: <http://www.highd-dataset.com>.
- [85] D. Karunakaran, J. S. Berrio, S. Worrall und E. Nebot, „Automatic lane change scenario extraction and generation of scenarios in OpenX format from real-world data,“ 2022. arXiv: 2203.07521. Adresse: <http://arxiv.org/abs/2203.07521>.
- [86] International Organization for Standardization, *Road vehicles - Test scenarios for automated driving systems - Scenario based safety evaluation framework*. ISO 34502, 2022.
- [87] P. Elspas, J. Langner, M. Aydinbas, J. Bach und E. Sax, „Leveraging Regular Expressions for Flexible Scenario Detection in Recorded Driving Data,“ *ISSE 2020 - 6th IEEE International Symposium on Systems Engineering, Proceedings*, 2020.

- 
- [88] T. Hülnhagen, I. Dengler, A. Tamke, T. Dang und G. Breuel, „Maneuver recognition using probabilistic finite-state machines and fuzzy logic,“ in *2010 IEEE Intelligent vehicles symposium (IV)*, 2010, S. 65–70.
  - [89] L. Ries, J. Langner, S. Otten, J. Bach und E. Sax, „A Driving Scenario Representation for Scalable Real-Data Analytics with Neural Networks,“ *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 2215–2222, 2019.
  - [90] L. Ries, P. Rigoll, T. Braun, T. Schulik, J. Daube und E. Sax, „Trajectory-Based Clustering of Real-World Urban Driving Sequences with Multiple Traffic Objects,“ *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, S. 1251–1258, 2021.
  - [91] H. Elrofai, J.-P. Paardekooper, E. de Gelder, S. Kalisvaart und O. op Den Camp, „Streetwise: Scenario-based safety validation of connected and automated driving,“ *Netherlands Organization for Applied Scientific Research, TNO*, S. 28, 2018.
  - [92] B. Schütt, M. Steimle, B. Kramer, D. Behnecke und E. Sax, „A Taxonomy for Quality in Simulation-based Development and Testing of Automated Driving Systems,“ *arXiv preprint*, 2021. arXiv: arXiv: 2102.06588v2.
  - [93] F. Klueck, Y. Li, M. Nica, J. Tao und F. Wotawa, „Using Ontologies for Test Suites Generation for Automated and Autonomous Driving Functions,“ *Proceedings - 29th IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops, ISSREW 2018*, S. 118–123, 2018.
  - [94] J. Tao, F. Klueck, H. Felbinger, M. Nica, F. Zieher, C. Wolf und C. Wang, „Automated Test Case Generation and Virtual Assessment Framework for un Regulation on Automated Lane Keeping Systems,“ *SAE Technical Papers*, Nr. 2021, S. 1–9, 2021.
  - [95] B. Schütt, „Exploration and Cluster-Based Analysis of Simulated Logical Scenarios for Testing Automated Driving Systems,“ Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe: Dissertation, 2024.

- [96] M. Tatar, „Chasing critical situations in large parameter spaces,“ in *Autonomous Vehicle Test & Development Symposium*, Stuttgart, 2018.
- [97] M. Koren, S. Alsaif, R. Lee und M. J. Kochenderfer, „Adaptive Stress Testing for Autonomous Vehicles,“ *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Nr. Iv, S. 1898–1904, 2018.
- [98] E. D. E. Gelder, H. Elrofai und A. K. Saberi, „Risk Quantification for Automated Driving Systems in Real-World Driving Scenarios,“ S. 168 953–168 970, 2021.
- [99] E. de Gelder, J. Hof, E. Cator, J.-P. Paardekooper, O. O. den Camp, J. Ploeg und B. De Schutter, „Scenario Parameter Generation Method and Scenario Representativeness Metric for Scenario-Based Assessment of Automated Vehicles,“ S. 1–14, 2022. arXiv: 2202.12025.
- [100] A. Krum, A. Miller, A. Sarkar, J. Engström, S. Soccilich, K. Grove, J. Hickman und R. Hanowski, „Naturalistic Driving Data Baseline for Automated Driving System-Equipped Commercial Motor Vehicles,“ United States. Department of Transportation. Federal Motor Carrier Safety Administration. Office of Analysis, Research, und Technology, Techn. Ber., 2021. Adresse: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/57507%0Ahttps://trid.trb.org/view/1878422>.
- [101] F. M. Favar, N. Nader, S. O. Eurich, M. Tripp und N. Varadaraju, „Examining accident reports involving autonomous vehicles in California,“ *PLoS ONE* 12(9): e0184952, 2017.
- [102] F. Hauer, T. Schmidt, B. Holzmüller und A. Pretschner, „Did We Test All Scenarios for Automated and Autonomous Driving Systems?“ *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*, S. 2950–2955, 2019.
- [103] E. de Gelder, „Safety assessment of automated vehicles using real-world driving scenarios,“ Delft: Dissertation, Delft University of Technology, 2022.

- 
- [104] T. Lotan, N. van Nes, G. Albert, O. Musicant, S. Reed und ..., „The potential of naturalistic driving studies with simple data acquisition systems (DAS) for monitoring driver behaviour,“ *UDRIVE Deliverable 52.1. EU FP7 Project UDRIVE Consortium*, 2017. Adresse: [https://doi.org/10.26323/UDRIVE%7B%5C\\_%7DD52.1](https://doi.org/10.26323/UDRIVE%7B%5C_%7DD52.1).
  - [105] SAE INTERNATIONAL, „J1698\_202303 - Event Data Recorder,“ 2023.
  - [106] California Department of Motor Vehicles (DMV), *Autonomous Vehicle Permit Holders Report 5.7 Million Test Miles in California*, 2023. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.dmv.ca.gov/portal/news-and-media/autonomous-vehicle-permit-holders-report-5-7-million-test-miles-in-california/>.
  - [107] J. Houston, G. Zuidhof, L. Bergamini, Y. Ye, L. Chen, A. Jain, S. Omani, V. Iglovikov und P. Ondruska, „One Thousand and One Hours: Self-driving Motion Prediction Dataset,“ in *4th Conference on Robot Learning (CoRL 2020)*, 2020. arXiv: 2006.14480. Adresse: <http://arxiv.org/abs/2006.14480>.
  - [108] C. Rösener, „A traffic-based method for safety impact assessment of road vehicle automation,“ Aachen: Dissertation, RWTH Aachen, 2020. Adresse: <https://publications.rwth-aachen.de/record/801589/files/801589.pdf>.
  - [109] H. Weber, F. Beringhoff, J. Josten und L. Eckstein, „Towards Modeling Driver Performance within Crash-relevant Scenarios as Virtual Reference for the Safety of Automated Vehicles,“ *Proceedings of the ESV - International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, 2023.
  - [110] N. Kauffmann, F. Fahrenkrog, L. Drees und F. Raisch, „Positive risk balance: a comprehensive framework to ensure vehicle safety,“ *Ethics and Information Technology*, Jg. 24, Nr. 1, S. 1–16, 2022. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s10676-022-09625-2>.
  - [111] F. Montanari, C. Stadler, J. Sichermann, R. German und A. Djanatliev, „Maneuver-based resimulation of driving scenarios based on real driving data,“ *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 1124–1131, 2021.

- [112] Automated Vehicle Safety Consortium, *AVSC Best Practice for In-Vehicle Fallback Test Driver Selection, Training, and Oversight Procedures for Automated Vehicles Under Test*. SAE Industry Technologies Consortia, 2019.
- [113] California Department of Motor Vehicles (DMV), *Autonomous Vehicle Collision Reports*, 2025. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/autonomous-vehicle-collision-reports/>.
- [114] J. P. Ehsani u. a., „Naturalistic Driving Studies: An Overview and International Perspective,“ *International Encyclopedia of Transportation*, S. 20–38, 2021.
- [115] J. M. Hankey, M. A. Perez und J. A. McClafferty, „Description of the SHRP 2 Naturalistic Database and the Crash, Near-Crash, and Baseline Data Sets,“ *Technical Report. Virginia Tech Transportation Institute*, 2016. Adresse: <http://hdl.handle.net/10919/70850%7B%5C%7D0Ahttps://www.infodesign.org.br/infodesign/article/view/355%7B%5C%7D0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/731%7B%5C%7D0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/269%7B%5C%7D0Ahttp://www.abergo.org.br/revi>.
- [116] D. Chand, S. Gupta und I. Kavati, „Computer Vision based Accident Detection for Autonomous Vehicles,“ *2020 IEEE 17th India Council International Conference, INDICON 2020*, 2020. arXiv: 2012.10870.
- [117] S. K. Bashetty, H. Ben Amor und G. Fainekos, „DeepCrashTest: Turning Dashcam Videos into Virtual Crash Tests for Automated Driving Systems,“ *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nr. iii, S. 11 353–11 360, 2020. arXiv: 2003.11766.
- [118] Y. Miao, G. Fainekos, B. Hoxha, H. Okamoto, D. Prokhorov und S. Mitra, „From Dashcam Videos to Driving Simulations: Stress Testing Automated Vehicles against Rare Events,“ Nov. 2024. Adresse: <http://arxiv.org/abs/2411.16027>.

- 
- [119] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, *Next Generation Simulation (NGSIM) Vehicle Trajectories and Supporting Data*, 2022. [Zugriff am 20. Mai 2025]. Adresse: <https://catalog.data.gov/dataset/next-generation-simulation-ngsim-vehicle-trajectories-and-supporting-data>.
  - [120] W. Zhan u. a., „INTERACTION Dataset: An INTERnational, Adversarial and Cooperative moTION Dataset in Interactive Driving Scenarios with Semantic Maps,“ 2019. arXiv: 1910.03088. Adresse: <http://arxiv.org/abs/1910.03088>.
  - [121] J. Bock, R. Krajewski, T. Moers, S. Runde, L. Vater und L. Eckstein, „The inD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Road User Trajectories at German Intersections,“ *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, Nr. Iv, S. 1929–1934, 2020. arXiv: 1911.07602.
  - [122] T. Moers, L. Vater, R. Krajewski, J. Bock, A. Zlocki und L. Eckstein, „The exiD Dataset: A Real-World Trajectory Dataset of Highly Interactive Highway Scenarios in Germany,“ *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, Jg. 2022-June, Nr. Iv, S. 958–964, 2022.
  - [123] F. Reway, A. Hoffmann, D. Wachtel, W. Huber, A. Knoll und E. Ribeiro, „Test Method for Measuring the Simulation-to-Reality Gap of Camera-based Object Detection Algorithms for Autonomous Driving,“ *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, Nr. Iv, S. 1249–1256, 2020.
  - [124] D. Otte, C. Krettek, H. Brunner und H. Zwipp, „Scientific Approach and Methodology of a New In-Depth- Investigation Study in Germany so called GIDAS,“ in *Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, National Highway Traffic Safety Administration, 2003. Adresse: <https://pdfs.semanticscholar.org/ed7c/accc9657bea3b6a55d0a58bedbcd50a86fd9.pdf>.
  - [125] National Highway Traffic Safety Administration, *Crash Report Sampling System*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.safercar.gov/crash-data-systems/crash-report-sampling-system>.

- [126] National Highway Traffic Safety Administration, *Fatality Analysis Reporting System (FARS)*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.nhtsa.gov/research-data/fatality-analysis-reporting-system-fars>.
- [127] J. M. Scanlon, K. D. Kusano, T. Daniel, C. Alderson, A. Ogle und T. Victor, „Waymo simulated driving behavior in reconstructed fatal crashes within an autonomous vehicle operating domain,“ *Accident Analysis and Prevention* 163, 2021.
- [128] F. Spitzhüttl, M. Petzold und H. Liers, *PCM from iGLAD database*. Verband der Automobilindustrie, 2015.
- [129] A. Fries, F. Fahrenkrog, K. Donauer, M. Mai und F. Raisch, „Driver Behavior Model for the Safety Assessment of Automated Driving,“ *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, Jg. 2022-June, Nr. Iv, S. 1669–1674, 2022.
- [130] A. Gambi, T. Huynh und G. Fraser, „Generating effective test cases for self-driving cars from police reports,“ in *Proceedings of the 2019 27th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*, 2019, S. 257–267.
- [131] National Highway Traffic Safety Administration, „National Motor Vehicle Crash Causation Survey: Report to Congress,“ 2008.
- [132] A. Gambi, V. Nguyen, J. Ahmed und G. Fraser, „Generating Critical Driving Scenarios from Accident Sketches,“ in *2022 IEEE International Conference On Artificial Intelligence Testing (AITest)*, 2022.
- [133] National Highway Traffic Safety Administration, *Crash Injury Research and Engineering Network*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.nhtsa.gov/research-data/crash-injury-research>.
- [134] ENABLE-S3, *Testing & Validation of Highly Automated Systems - Summary of Results*, 2019. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.offis.de/offis/projekt/enable-s3.html>.

- 
- [135] SET Level, *Simulationsbasiertes Entwickeln und Testen von Automatisiertem Fahren*, 2019. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://setlevel.de/>.
  - [136] V&V Methoden, *Verifikations- und Validierungsmethoden automatisierter Fahrzeuge im urbanen Umfeld*, 2019. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.vvm-projekt.de>.
  - [137] F. Köster, S. Rude und S. Hallerbach, *SET Level - Methodologies for Simulation-Based Engineering Tasks Towards a SET Level Methodology*, 2021. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://setlevel.de/assets/mid-term-presentation/Methodology.pdf>.
  - [138] ASAM, *ASAM OSI - Open Simulation Interface*, 2021. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.asam.net/standards/detail/osi/>.
  - [139] *VVMMethoden - Zusammenfassender Abschlussbericht*, 2024. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.vvm-projekt.de/veroeffentlichungen>.
  - [140] J. Reich und M. Nolte, *VVM Assurance Argumentation - How to systematically organize the approval concerns for safe AD systems in a structured framework?* 2022. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: [https://www.vvm-projekt.de/fileadmin/user\\_upload/Mid-Term/Presentations/VVM\\_HZE\\_MS4\\_20220315\\_AssuranceArgumentation.pdf](https://www.vvm-projekt.de/fileadmin/user_upload/Mid-Term/Presentations/VVM_HZE_MS4_20220315_AssuranceArgumentation.pdf).
  - [141] U. N. E. C. for Europe (UNECE), „Ece/Trans/Wp.29/2020/81: Proposal for a new UN Regulation on uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to Automated Lane Keeping System,“ Jg. 2020, S. 1–63, 2020. Adresse: <https://undocs.org/ECE/TRANS/WP.29/2020/81>.
  - [142] C. Luetge, „The German Ethics Code for Automated and Connected Driving,“ *Philosophy & Technology*, Jg. 30, Nr. 4, S. 547–558, 2017.
  - [143] J. Nuffer, *Structure of Verification and Validation*, 2022. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: [https://www.vvm-projekt.de/fileadmin/user\\_upload/Mid-Term/Presentations/VVM\\_HZE\\_S2\\_P1\\_20220315\\_StructureVerificationValidation.pdf](https://www.vvm-projekt.de/fileadmin/user_upload/Mid-Term/Presentations/VVM_HZE_S2_P1_20220315_StructureVerificationValidation.pdf).

- [144] C. Association, *SUNRISE - Safety assUraNce fRamework for connected, automated mobility SystEms*, 2025. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.ccam.eu/projects/sunrise/>.
- [145] V4SAFETY, *V4SAFETY - Vehicles and VRU Virtual eEvaluation of Road Safety*, 2025. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://v4safetyproject.eu>.
- [146] SYNERGIES, *SYNERGIES project*, 2025. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://synergies-ccam.eu>.
- [147] SCSC Assurance Case Working Group, „Goal Structuring Notation Community Standard: Version 3“ 2021. Adresse: <https://scsc.uk/scsc-141C>.
- [148] M. Wagner und C. Carlan, *The Open Autonomy Safety Case Framework*, 2024.
- [149] J. Reich, M. Nolte, N. F. Salem, T. Brade, M. Fistler, D. Hillen und C. Lalitsch-Schneider, *VVM Safety Argumentation*, 2023. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.vvm-projekt.de/en/argumentation>.
- [150] Underwriters Laboratories (UL), „UL 4600: Standard for Safety Evaluation of Autonomous Products“, 2023.
- [151] Insurance Institute for Highway Safety (IIHS), *Advanced driver assistance: Autonomous vehicle laws*, 2023. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.iihs.org/topics/advanced-driver-assistance/highly-automated-vehicle-laws>.
- [152] Aurora Innovation Inc., *Aurora's Safety Case Framework*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://safetycaseframework.aurora.tech/gsn>.
- [153] N. F. Salem, T. Kirschbaum, M. Nolte, C. Lalitsch-Schneider, R. Graubohm, J. Reich und M. Maurer, „Risk Management Core -Toward an Explicit Representation of Risk in Automated Driving“, *IEEE Access*, Jg. 12, S. 33 200–33 217, 2024.

- 
- [154] U. Di Fabio, M. Broy, R. J. Brüngger, U. Eichhorn, A. Grunwald, D. Heckmann und E. Hilgendorf, „Ethik-Kommission - Automatisiertes und vernetztes Fahren,“ *Bericht der Ethik-Kommission eingesetzt durch den Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur*, 2017.
  - [155] Horizon 2020 Commission Expert Group to advise on specific ethical issues raised by und driverless mobility (E03659), *Ethics of Connected and Automated Vehicles: recommendations on road safety, privacy, fairness, explainability and responsibility*. Publication Office of the European Union: Luxembourg, 2020.
  - [156] E. de Gelder und O. Op den Camp, „How certain are we that our automated driving system is safe?“ *Traffic injury prevention*, Jg. 24, Nr. S1, S131–S140, 2023. Adresse: <https://doi.org/10.1080/15389588.2023.2186733>.
  - [157] J. M. Scanlon, K. D. Kusano, L. A. Fraade-Blanar, T. L. McMurry, Y.-H. Chen und T. Victor, „Benchmarks for Retrospective Automated Driving System Crash Rate Analysis Using Police-Reported Crash Data,“ 2023. Adresse: <http://arxiv.org/abs/2312.13228>.
  - [158] M. Rothoff, H. Zarghampour, E. Tivesten, T. Victor, A. Ödblom, T. Bergh und B. Lindenberg, *ADEST - Autonomous Driving Effects on Sustainable Transportation & ADFE - Autonomous Driving Fuel Economy*, 2019. Adresse: <https://www.vinnova.se/globalassets/mikrosajter/ffi/dokument/slutrapporter-ffi/trafiksakerhet-och-automatiserade-fordon-rapporter/2014-06012-driveme.pdf>.
  - [159] S. Shalev-Shwartz, S. Shammah und A. Shashua, „On a Formal Model of Safe and Scalable Self-driving Cars,“ 2017. arXiv: 1708.06374. Adresse: <http://arxiv.org/abs/1708.06374>.
  - [160] M. Witt, L. Wang, F. Fahrenkrog, K. Kompaß und G. Prokop, „Cognitive Driver Behavior Modeling: Influence of Personality and Driver Characteristics on Driver Behavior,“ *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Jg. 786, S. 751–763, 2019. Adresse: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-93885-1\\_69](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-93885-1_69).

- [161] M. Witt, K. Kompaß, L. Wang, R. Kates, M. Mai und G. Prokop, „Driver profiling - Data-based identification of driver behavior dimensions and affecting driver characteristics for multi-agent traffic simulation,“ *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Jg. 64, S. 361–376, 2019.
- [162] J. M. Scanlon, K. D. Kusano, J. Engström und T. Victor, *Collision Avoidance Effectiveness of an Automated Driving System Using a Human Driver Behavior Reference Model in Reconstructed Fatal Collisions*. Waymo, LLC, 2022.
- [163] J. Engström, S.-Y. Liu, A. Dinparastdjadid und C. Simoiu, „Modeling road user response timing in naturalistic settings: a surprise-based framework,“ Aug. 2022. Adresse: <https://arxiv.org/abs/2208.08651v2>.
- [164] K. D. Kusano, K. Beatty, S. Schnelle, F. Favaro, C. Crary und T. Victor, „Collision Avoidance Testing of the Waymo Automated Driving System,“ Dez. 2022. Adresse: <https://arxiv.org/abs/2212.08148v1>.
- [165] A. Tejada, M. J. E. Legius, A. R. Kalose, P. F. V. Oliveira, E. V. Dam und J. H. Hogema, „Towards a Practical Methodology for Defining Competent Driving,“ in *2023 26th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2023.
- [166] E. Papadimitriou, A. Pooyan Afghari, D. Tselentis und P. van Gelder, „Road-safety-II: Opportunities and barriers for an enhanced road safety vision,“ *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 174, S. 106 723, 2022. Adresse: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106723>.
- [167] M. Treiber und A. Kesting, *Traffic Flow Dynamics*. Springer, 2013, Bd. 1.
- [168] R. Wiedemann und U. Reiter, „Microscopic traffic simulation: the simulation system MISSION, background and actual state,“ *Project ICARUS (V1052) Final Report*, Jg. 2, S. 1–53, 1992.
- [169] P. G. Gipps, „A behavioural car-following model for computer simulation,“ *Transportation research part B: methodological*, Jg. 15, Nr. 2, S. 105–111, 1981.

- 
- [170] S. Krauss, *Microscopic modeling of traffic flow: investigation of collision free vehicle dynamics*, 1998.
  - [171] M. Treiber und A. Kesting, „Microscopic Calibration and Validation of Car-Following Models – A Systematic Approach,“ *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Jg. 80, S. 922–939, 2013. arXiv: 1403.4990. Adresse: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.05.050>.
  - [172] L. Li, X. M. Chen und L. Zhang, „A global optimization algorithm for trajectory data based car-following model calibration,“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 68, S. 311–332, 2016.
  - [173] K. Adjenughwure, A. Tejada, P. F. V. Oliveira, J. Hogema und G. Klunder, „A New Safety Objective for the Calibration of the Intelligent Driver Model,“ 2023. arXiv: 2310.04259. Adresse: <https://arxiv.org/abs/2310.04259>.
  - [174] B. Efron, „Bootstrapping methods: Another look at the jackknife,“ *Annals of Statistics* 7, S. 1–26, 1979.
  - [175] F. Wu, J. Lu und J. Jiang, „Estimation of car-following model parameters distribution using bootstrap method,“ *Proceedings of the 3rd International Conference on Road Safety and Simulation*, 2011.
  - [176] U. N. E. C. for Europe (UNECE), „Proposal for the 01 series of amendments to UN Regulation No. 157 (Automated Lane Keeping Systems),“ *Addendum 156 to the 1958 Agreement - UN Regulation No. 157*, 2022.
  - [177] U. N. E. C. for Europe (UNECE), „Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems,“ *Addendum 156 to the 1958 Agreement - UN Regulation No. 157*, 2023. Adresse: <https://unece.org/transport/documents/2023/03/standards/un-regulation-no-157-amend4>.
  - [178] U. N. E. C. for Europe (UNECE), *Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles (R.E.3)*, Juli 2017.

- [179] U. N. .-. T. Collection, *Status of Treaties - Chapter XI - Transport and Communications - B. Road Traffic - 16. 157 United Nations Regulation No. 157*, März 2025. Adresse: [https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg\\_no=XI-B-16-157&chapter=11&clang=\\_en](https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XI-B-16-157&chapter=11&clang=_en).
- [180] Japan Automobile Manufacturers Association, „Automated Driving Safety Evaluation Framework.“ Adresse: <https://www.jama.or.jp/english/reports/framework.html>.
- [181] U. N. E. C. for Europe (UNECE), „UN Regulation No. 152 - Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Advanced Emergency Braking System (AEBS) for M1 and N1 vehicles,“ Revision 2 2023.
- [182] *New York DMV / Chapter 8: Defensive Driving*. Adresse: <https://dmv.ny.gov/about-dmv/chapter-8-defensive-driving>.
- [183] K. Mattas, G. Albano, R. Donà, M. C. Galassi, R. Suarez-Bertoa, S. Vass und B. Ciuffo, „Driver models for the definition of safety requirements of automated vehicles in international regulations. Application to motorway driving conditions,“ *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 174, Sep. 2022.
- [184] B. Vanholme, D. Gruyer, B. Lusetti, S. Glaser und S. Mammar, „Highly automated driving on highways based on legal safety,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 14, Nr. 1, S. 333–347, 2013.
- [185] V. A. Güttinger, „Conflict Observation in Theory and in Practice,“ *International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques*, S. 17–24, 1984. Adresse: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-82109-7\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-82109-7_3).
- [186] Daimler Truck AG, *Mercedes-Benz Trucks presents two worldwide innovations in their trucks for more safety on the road*, 2020. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/en/instance/ko.xhtml?oid=47504429>.

- 
- [187] Automated Vehicle Safety Consortium, *Automated Vehicle Safety Consortium*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://avsc.sae-itc.org/>.
  - [188] F. Reisgys, M. Elgharbawy, A. Schwarzhaft und E. Sax, „Argumentation on ADAS Simulation Validity using Aleatory and Epistemic Uncertainty Estimation,“ in *Proceedings of the Driving Simulation Conference 2021 Europe VR*, A. Kemeny, J.-R. Chardonnet und F. Colombet, Hrsg., Munich, Germany, 2021, S. 25–32.
  - [189] S. Riedmaier, „Model Validation and Uncertainty Aggregation for Safety Assessment of Automated Vehicles,“ München: Dissertation, Technische Universität München, 2022.
  - [190] R. Dona und B. Ciuffo, „Virtual Testing of Automated Driving Systems. A Survey on Validation Methods,“ *IEEE Access*, Jg. 10, S. 24 349–24 367, 2022.
  - [191] Automated Vehicle Safety Consortium, „AVSC Best Practice for Developing ADS Safety Performance Thresholds Based on Human Driving Behavior,“ 2023.
  - [192] P. Elspas., Y. Klose., S. Isele., J. Bach. und E. Sax., „Time Series Segmentation for Driving Scenario Detection with Fully Convolutional Networks,“ in *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems - VEHITS*, INSTICC, SciTePress, 2021, S. 56–64.
  - [193] E. de Gelder und O. Op den Camp, „Scenario-based assessment of automated driving systems: How (not) to parameterize scenarios?,“ 2024. Adresse: <http://arxiv.org/abs/2409.01117>.
  - [194] P. Olleja, G. Markkula und J. Bärgman, „Validation of human benchmark models for Automated Driving System approval: How competent and careful are they really?“ *Accident Analysis and Prevention* 213 (2025) 107922, 2025.
  - [195] T. Zhao, E. Yurtsever, J. A. Paulson und G. Rizzoni, „Formal Certification Methods for Automated Vehicle Safety Assessment,“ *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Jg. 8, Nr. 1, S. 232–249, 2023.

- [196] J. Bernhard, T. Schulik, M. Schutera und E. Sax, „Adaptive test case selection for DNN-based perception functions,“ *ISSE 2021 - 7th IEEE International Symposium on Systems Engineering, Proceedings*, 2021.
- [197] C. Linnhoff, P. Rosenberger, S. Schmidt und L. Elster, „Towards Serious Perception Sensor Simulation for Safety Validation of Automated Driving - A Collaborative Method to Specify Sensor Models,“ *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, S. 2688–2695, 2021.
- [198] M. Hoss, M. Scholtes und L. Eckstein, „A Review of Testing Object-Based Environment Perception for Safe Automated Driving,“ *Automotive Innovation*, Jg. 5, Nr. 3, S. 223–250, 2022. arXiv: 2102.08460. Adresse: <https://doi.org/10.1007/s42154-021-00172-y>.
- [199] SAE International, „J3018 - Safety-Relevant Guidance for On-Road Testing of SAE Level 3, 4, and 5 Prototype Automated Driving System (ADS)-Operated Vehicles,“ 2020.
- [200] Torc Robotics, Inc., „Innovating Safety and Efficiency - Torc Safety Report,“ 2021.
- [201] *DeepScenario Dataset: Unparalleled Sedillo (v2)*, 2022. Adresse: <https://app.deepscenario.com>.
- [202] S. Toma, E. Swanson, J. D. Smith und W. G. Najm, *Heavy Truck Pre-Crash Scenarios for Safety Applications Based on Vehicle-to-Vehicle Communications*. No. DOT-VNTSC-NHTSA-11-14. United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration, 2014.
- [203] F. J. Massey, Jr., „The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit,“ *J. Amer. Stat. Assoc.*, vol. 46, no. 253, S. 68–78, 1951.
- [204] U. N. E. C. for Europe (UNECE), „UN Regulation No. 131 - Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Advanced Emergency Braking Systems (AEBS) for M2, M3, N2 and N3 vehicles,“ Revision 1 - Amendment 2 2023.

- [205] „Competent and Careful human driver performance model,“ Techn. Ber., Nov. 2020. Adresse: <https://wiki.unece.org/download/attachments/113344748/FRAV-07-10.pdf?api=v2>.
- [206] U.S. Census Bureau, *2019 TIGER/Line Shapefiles Technical Documentation*. 2019. Adresse: [https://www2.census.gov/geo/pdfs/maps-data/data/tiger/tgrshp2019/TGRSHP2019%7B%5C\\_%7DTechDoc.pdf](https://www2.census.gov/geo/pdfs/maps-data/data/tiger/tgrshp2019/TGRSHP2019%7B%5C_%7DTechDoc.pdf).
- [207] Allied Business Intelligence, Inc., *Geotab, Lytx, Samsara, Solera, and PowerFleet Take the Lead in ABI Research's Commercial Video Telematics Vendor Competitive Ranking*, 2023. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.abiresearch.com/press/geotab-lytx-samsara-solera-and-powerfleet-take-the-lead-in-abi-researchs-commercial-video-telematics-vendor-competitive-ranking>.
- [208] C. Chau und Q. Liu, „Driver Modelling for Virtual Safety Assessment of Automated Vehicle Functionality in Cut-in Scenarios,“ *Master's Thesis, Chalmers University of Technology*, Adresse: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/304058>.
- [209] Reichenbach, Michael, *Fahrerassistenz auf dem Weg zum autonomen Fahren*, 2008. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.springerprofessional.de/fahrerassistenz/automatisiertes-fahren/fahrerassistenz-auf-dem-weg-zum-autonomen-fahren/15690872>.
- [210] Waymo LLC, *Waymo Safety Impact*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://waymo.com/safety/impact/>.
- [211] Lytx, *Lytx's 2024 State of the Data Report Highlights Increased Road Risks and Key Safety Trends*. [Zugriff am 30. Mai 2025]. Adresse: <https://www.lytx.com/news-events/press-release/2024/state-of-the-data-2024>.
- [212] U. N. E. C. for Europe (UNECE), *Regulation No 13-H of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) - Uniform provisions concerning the approval of passenger cars with regard to braking* [2015/2364], Dez. 2015.



## Eigene Publikationen

- [213] F. Reisgys, J. Plaum, A. Schwarzhaupt und E. Sax, „Scenario-based X-in-the-Loop Test for Development of Driving Automation,“ in *14. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren 2022*, Uni-Das e.V., 2022.
- [214] T. Braun, J. Fuchs, F. Reisgys, L. Ries, J. Plaum, B. Schütt und E. Sax, „A Review of Scenario Similarity Measures for Validation of Highly Automated Driving,“ in *2023 IEEE 26th Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2023.
- [215] J. Ransiek, J. Plaum, J. Langner und E. Sax, „GOOSE: Goal-Conditioned Reinforcement Learning for Safety-Critical Scenario Generation,“ in *2024 IEEE 27th Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2024.
- [216] F. Reisgys, J. Plaum, A. Schwarzhaupt und E. Sax, „Validation and Plausibilization of X-in-the-Loop Tests for Driving Automation,“ in *Proceedings of the ESV - International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Yokohama, Japan, 2023.
- [217] J. Plaum, A. Tejada, J. Günther und E. Sax, „Toward the definition of competent driving for the assessment of automated driving systems,“ in *16. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren 2025*, Uni-Das e.V., 2025.



# Patente

- [218] M. Köper, J. Plaum, M. Bause und A. Scholich, „Systems and Methods of validating simulated data for developing autonomous vehicles using classification,“ filing date 14.02.2025, 2025.
- [219] F. Stein, J. Torzewski, D. Zechmann und J. Plaum, „Fahrzeug mit einer Fahrerkabine,“ WO2023217451A1 / DE102022112069A1, 2022.
- [220] F. Stein, D. Zechmann, J. Plaum und J. Torzewski, „Verfahren zum Betreiben eines elektrischen Energiespeichers eines zumindest teilweise elektrisch betriebenen Kraftfahrzeugs sowie elektrischer Energiespeicher,“ DE102022129938A1, 2022.
- [221] F. Stein, J. Plaum, D. Zechmann und J. Torzewski, „Verfahren zum Betrieb eines Nutzfahrzeuggespanns im Fall eines Brandes,“ DE102022133739A1, 2022.
- [222] F. Stein, J. Torzewski, J. Plaum und D. Zechmann, „Verfahren zum autonomen Betanken eines Kraftstofftanks eines ersten Kraftwagens,“ DE102022129364A1, 2022.
- [223] F. Stein, J. Plaum, J. Torzewski und D. Zechmann, „Koppeleinrichtung zum Koppeln einer Sattelzugmaschine mit einem Sattelaufleger,“ DE102023102524A1, 2023.
- [224] F. Stein, J. Torzewski, D. Zechmann und J. Plaum, „Vorrichtung und ein Verfahren zum Abdecken oder Abschalten von auf einer Außenfläche eines Fahrzeugs angezeigten Informationen,“ US20240300330A1 / DE102023105644A1, 2023.
- [225] J. Plaum, F. Stein, J. Torzewski und D. Zechmann, „Fahrzeug mit Drone,“ DE102023102522A1, 2023.



## **Betreute studentische Arbeiten**

- [226] C. Braess, „Reference Models for the Scenario-Based Evaluation of Highly Automated Trucks,“ Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.
- [227] J. Bächle, „Entwicklung von Proximitätsmaßen für Szenarien zum Testen hochautomatisierter Fahrzeuge,“ Masterarbeit, Hochschule Esslingen, 2024.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Anwendungsfall Hub zu Hub . . . . .	2
1.2	Struktur der Dissertation . . . . .	5
2.1	V-Modell [28] (basierend auf [8], [31] und [29]) . . . . .	15
2.2	Scrum Framework aus [16], basierend auf [37] . . . . .	16
2.3	Exemplarischer Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie [213] . . . . .	18
2.4	Entwicklung der Szenarienkategorien resultierend aus den Aktivitäten der ISO 21448 [45] . . . . .	21
2.5	Vergleich zwischen erforderlichem, spezifiziertem und implementiertem Verhalten [48] . . . . .	22
3.1	XiL-Aufbau für den Test automatisierter Fahrzeuge [213] . . .	28
3.2	Dynamischer Fahrsimulator (Mercedes-Benz) [59] . . . . .	30
3.3	Darstellung von Szene und Szenario nach [62] . . . . .	32
3.4	Funktionale, logische und konkrete Szenarien nach [66] . . .	34
3.5	Abstraktionsebenen von Szenarien nach [67] . . . . .	35
3.6	Einordnung von abstrakten, logischen und konkreten Szenarien in den Entwicklungsprozess nach dem V-Modell nach [72] . . . . .	37
3.7	6-Ebenen Modell zur Beschreibung von urbanem Umfeld und Verkehr [76] . . . . .	39
3.8	PEGASUS Methode [61] vereinfacht nach [81] . . . . .	45
3.9	Framework für szenarienbasiertes Testen basierend auf [82] . . . . .	46
3.10	Arten von Szenarien in Anlehnung an die Definition aus [214] . . . . .	47

3.11	Matrix: Unfall vs. Beinahe-Unfall, Mensch vs. System unter Test . . . . .	54
3.12	Konzeptioneller Zusammenhang zwischen gesammelter Datenmenge und Datenqualität angelehnt an [104] . . . . .	58
3.13	Vereinfachte Darstellung des VVM Absicherungs-Framework aus [139] . . . . .	71
3.14	Auszug aus VVM-Sicherheitsargumentation als GSN [149] . . . . .	76
4.1	Einscherszenario mit dem ALKS-Fahrzeug (blau) und dem einscherenden Fahrzeug (rot) . . . . .	91
4.2	Ausscherszenario mit dem ALKS-Fahrzeug (blau), dem ausscherenden Fahrzeug (rot) und dem anfangs verdeckten Fahrzeug (gelb) . . . . .	92
4.3	Bremsszenario mit dem ALKS-Fahrzeug (blau) und dem bremsenden Fahrzeug (rot) . . . . .	92
4.4	Modell der Reaktionszeiten eines CCHD [180] . . . . .	94
4.5	Einscherszenario mit Parametern des CCHD-Modells für das ALKS-Fahrzeug (blau) und einscherende Fahrzeug (rot) . . . . .	96
4.6	Ausscherszenario mit Parametern des CCHD-Modells für das ALKS-Fahrzeug (blau), ausscherende (rot) und verdeckte Fahrzeug (gelb) . . . . .	96
4.7	Bremsszenario mit Parametern des CCHD-Modells für das ALKS-Fahrzeug (blau) und vorausfahrende Fahrzeug (rot) . . . . .	97
4.8	Überblick über die vom FSM verwendeten kinematischen und geometrischen Werte des ALKS-Fahrzeugs (blau) und eines weiteren Fahrzeugs (rot) . . . . .	98
4.9	Aktivitätsdiagramm des FSM basierend auf [177] . . . . .	103
4.10	Kollisionsregionen der Modelle für das Einscherszenario bei niedriger und hoher Geschwindigkeit . . . . .	107
5.1	Neuer Prozess zur Freigabeargumentation hochautomatisierter Nutzfahrzeuge . . . . .	115
5.2	Prozessschritt 1 . . . . .	117
5.3	Prozessschritt 2 . . . . .	119

5.4	Prozessschritt 3 . . . . .	122
5.5	Übersicht des Gesamtprozesses zur strukturierten Freigabeargumentation . . . . .	124
5.6	Erweiterung der VVM-Sicherheitsargumentation (vgl. Abb. 3.14) . . . . .	126
5.7	Einordnung in Framework für szenarienbasiertes Testen basierend auf [82] und [214] . . . . .	127
5.8	Vergleich von simulierten und beobachteten Szenarien . . . . .	129
5.9	Darstellung der ODD-Abdeckung basierend auf [195] . . . . .	133
5.10	Einordnung in exemplarischen Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie [213] . . . . .	136
6.1	GSN der VVM-Sicherheitsargumentation (vgl. Abb. 3.14) erweitert um Gesamtprozess (vgl. Abb. 5.6) und Ergebnisse des Anwendungsfalls eines kompetenten Fahrermodells als Akzeptanzkriterium . . . . .	140
6.2	Ergebnis GSN Prozessschritt 1 (vgl. Abb. 6.1) . . . . .	142
6.3	Ergebnis GSN Prozessschritt 2 (vgl. Abb. 6.1) . . . . .	146
6.4	Darstellung des Szenarios Folgefahrt . . . . .	147
6.5	Datenquellen und Verarbeitungsschritte . . . . .	148
6.6	Drohnenaufnahme, annotiert mit dreidimensionalen Bounding-Boxen von DeepScenario . . . . .	150
6.7	Verteilung der mittleren Ego-Geschwindigkeit während der Folgefahrt-Szenarien . . . . .	152
6.8	Verteilung der mittleren THW während der Folgefahrt-Szenarien . . . . .	153
6.9	Ergebnis GSN Prozessschritt 3 (vgl. Abb. 6.1) . . . . .	155
7.1	GSN der VVM-Sicherheitsargumentation (vgl. Abb. 3.14) erweitert um Gesamtprozess (vgl. Abb. 5.6) und Ergebnisse des Anwendungsfalls eines Fahrermodells als Akzeptanzkriterium für kritische Szenarien . . . . .	164
7.2	Ergebnis GSN Prozessschritt 1 (vgl. Abb. 7.1) . . . . .	166
7.3	Zustandsdiagramm für Simulation des Referenzmodells . . . . .	169

7.4	Simulationsmodell für mehrere Akteure mit anteiligen Reaktionszeiten (farbig) . . . . .	171
7.5	CCHD-Reaktionsmodell aus Abb. 4.4 erweitert um geteilte Reaktionszeiten $b_1$ , $b_2$ und $b_3$ . . . . .	172
7.6	Beispiel einer Modellreaktion auf ein einscherendes Fahrzeug, das mit $4.5 \text{ m s}^{-2}$ abbremst . . . . .	174
7.7	Beispiel für die Reaktion eines Modells mit der angepassten CFS-Metrik auf ein einscherendes Fahrzeug, das mit $4.5 \text{ m s}^{-2}$ abbremst . . . . .	177
7.8	Ergebnis GSN Prozessschritt 2 (vgl. Abb. 7.1) . . . . .	182
7.9	Extraktion von Informationen aus kritischen Realdaten von Dashcam-Systemen zur Flottenüberwachung . . . . .	185
7.10	Schritte zur Generierung eines ausführbaren Szenarios . . . . .	186
7.11	Szene aus einem rekonstruierten kritischen Einscherer-Szenario mit Unfallfolge in der Simulationsumgebung Log Sim . . . . .	187
7.12	Verwendete SiL-Umgebung (vgl. Abb. 3.1) . . . . .	188
7.13	Vergleich der Parameterverteilung des Einscherszenarios aus rekonstruierten kritischen Szenarien . . . . .	194
7.14	Vergleich der Parameterverteilung des Einscherszenarios aus rekonstruierten kritischen Szenarien . . . . .	195
7.15	Ergebnis GSN Prozessschritt 3 (vgl. Abb. 7.1) . . . . .	197
7.16	Anzahl der Kollisionen des FSM in Bezug auf die laterale Geschwindigkeit des Einscherers . . . . .	200
7.17	Kollisionsbereiche für verschiedene Modellvarianten mit $G_{x,\max} = 7 \text{ m s}^{-2}$ , $v_{e,0} = 120 \text{ km h}^{-1}$ und $v_{o,0} = 100 \text{ km h}^{-1}$ . . . . .	206
7.18	Falsch-positive Reaktionen nach Modellvariante und Auswertemethode, verglichen mit den Ergebnissen aus [183] . . . . .	208
7.19	Falsch-positive Reaktionen nach Modellvariante und Auswertemethode unter Verwendung einer Reaktionsschwelle von $a_{th,Brems} = -1.3 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	209

7.20	Vergleich der Reaktionsintensität und der Kollisionsgeschwindigkeiten von Referenzmodell und menschlichem Fahrer . . . . .	213
7.21	Beispiel für ein Ausweichmanöver durch den menschlichen Fahrer . . . . .	214
A.1	Einscher- & Bremsszenario mit $G_{x,\max} = 0 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	278
A.2	Einscher- & Bremsszenario mit $G_{x,\max} = 1 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	279
A.3	Einscher- & Bremsszenario mit $G_{x,\max} = 2 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	280
A.4	Einscher- & Bremsszenario mit $G_{x,\max} = 3 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	281
A.5	Einscher- & Bremsszenario mit $G_{x,\max} = 4 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	282
A.6	Einscher- & Bremsszenario mit $G_{x,\max} = 5 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	283
A.7	Einscher- & Bremsszenario mit $G_{x,\max} = 6 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	284
A.8	Einscher- & Bremsszenario mit $G_{x,\max} = 7 \text{ m s}^{-2}$ . . . . .	285



# Tabellenverzeichnis

2.1	Automatisierungslevel nach SAE [18] . . . . .	10
2.2	Beschreibung der Flächen aus Abb. 2.5 . . . . .	23
3.1	Kategorien von Datenquellen für eine Szenariendatenbank nach [9], [28] und [13] . . . . .	47
3.2	Unfallrate von Nutzfahrzeugen der Klasse 8 auf US Autobahnen aus [100] . . . . .	56
3.3	Bewertung von Datenquellen für kritische Szenarien nach den Kriterien Verfügbarkeit von kritischen Szenarien mit Unfallfolgen a1) sowie ohne Unfallfolgen a2), Datenqualität b) und Verfügbarkeit einer menschlichen Referenz c) . . . . .	68
3.4	In ISO 21448 verwendete Elemente der GSN [45] . . . . .	74
3.5	In ISO 21448 [45] und [149] zusätzlich verwendete Elemente der GSN . . . . .	75
3.6	Beispiel für IDM-Parameter eines aggressiven und defensiven Fahrers nach [167] . . . . .	85
4.1	Beschreibung der vom FSM verwendeten kinematischen und geometrischen Werte [177] . . . . .	98
4.2	FSM-Modellparameter [177] . . . . .	99
4.3	Parameterbereiche des Einscherszenarios . . . . .	105
4.4	Anzahl der Kollisionen pro Modell für das ALKS-Einscherszenario . . . . .	106
4.5	Parameterbereich des Ausscherszenarios . . . . .	108
4.6	Anzahl der Kollisionen pro Modell für das ALKS-Ausscherszenario . . . . .	108
4.7	Parameterbereich des Bremsszenarios . . . . .	108

4.8	Anzahl der Kollisionen pro Modell für das ALKS-Bremsszenario . . . . .	109
6.1	Anzahl der erfassten Fahrzeugen im Drohnen-Datensatz . . . . .	150
6.2	Parametergrenzen und kalibrierte Parameter des IDM für den IFTD-Datensatz . . . . .	154
6.3	Optimale Lösung, Stichprobenmittelwerte und 95 % Konfidenzintervalle der IDM-Parameter für den IFTD-Datensatz . . . . .	157
6.4	Optimale Lösung, Stichprobenmittelwerte und 95 % Konfidenzintervalle der IDM-Parameter für den Drohnen-Datensatz . . . . .	157
6.5	Optimale Lösung, Stichprobenmittelwerte und 95 % Konfidenzintervalle der IDM-Parameter für den SuT-Datensatz . . . . .	158
6.6	RMSE der Geschwindigkeit berechnet für alle Kombinationen der optimalen IDM-Parameter und Datensätze für IFTD, Drohne und SuT . . . . .	159
7.1	Werte für den TTC-Schwellenwert aus [226] . . . . .	179
7.2	Parameter des FSM nach UN-Regelung Nr. 157 [177] . . . . .	180
7.3	Abschätzung der dem Datensatz zugrunde liegenden zurückgelegten Fahrzeugkilometer von Nutzfahrzeugen der Klasse 8 auf US Autobahnen . . . . .	191
7.4	Varianten der evaluierten Modellerweiterungen . . . . .	199
7.5	Kontingenztafel der Kollisionen für gewählte $TTC_{th}$ -Schwellenwerte im Einscherszenario . . . . .	199
7.6	Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der modifizierten CFS-Metrik für das Ausscherszenario . . . . .	201
7.7	Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der modifizierten CFS-Metrik für das Bremsszenario . . . . .	201
7.8	Parameterbereiche des kombinierten Einscher- und Abbremszenarios . . . . .	202

---

7.9	Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der Änderung der CFS-Metrik für das Einscher- und Bremsszenario . . . . .	203
7.10	Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der Änderung des TTC-Schwellenwerts $TTC_{th} = 8.5$ s für das Einscher- und Bremsszenario . . . . .	204
7.11	Kontingenztafel der Kollisionen zum Vergleich der Auswirkungen der Änderung des TTC-Schwellenwerts $TTC_{th} = 11$ s für das Einscher- und Bremsszenario . . . . .	204
7.12	Vergleich der Kollisionsbereiche des ursprünglichen FSM mit dem FSM-8.5-mod-Modell . . . . .	205
7.13	Kontingenztafel der Kollisionen von menschlichen Fahrern im Vergleich zu den Kollisionen des Referenzmodells . . . . .	212
7.14	Kontingenztafel der Kollisionen von menschlichen Fahrern im Vergleich zu den Kollisionen des SuT . . . . .	215
A.1	Parameter der ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [141] - Betriebsbedingungen . . . . .	273
A.2	Parameter der ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [141] - Anfangsbedingungen . . . . .	274
A.3	Parameter der ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [141] - Fahrzeugbewegung . . . . .	275
A.4	Vollständige Kontingenztafel der Kollisionsbereiche der Modelle im Einscher- und Bremsszenario (C = Kollision, N = Keine Kollision) . . . . .	277



# **Abkürzungsverzeichnis**

<b>ACC</b>	Adaptive Cruise Control
<b>ADAS</b>	Advanced Driver Assistance System
<b>ADS</b>	Automated Driving System
<b>AEB</b>	Automated Emergency Braking
<b>ALKS</b>	Automated Lane-Keeping System
<b>ASAM</b>	Association for Standardization of Automation and Measuring Systems
<b>AVSC</b>	Automated Vehicle Safety Consortium
<b>BAST</b>	Bundesanstalt für Straßenwesen
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>CCHD</b>	Competent and Careful Human Driver Model
<b>CFS</b>	Critical Fuzzy Surrogate Safety Metric
<b>CIREN</b>	Crash Injury Research and Engineering Network
<b>CNTD</b>	Canadian Naturalistic Truck Dataset

<b>CRSS</b>	Crash Report Sampling System
<b>DAS</b>	Driver Assistance System
<b>DDT</b>	Dynamic Driving Task
<b>DiL</b>	Driver-in-the-Loop
<b>DIRECT</b>	DIviding RECTangles
<b>ECU</b>	Electronic Control Unit
<b>EDR</b>	Event Data Recorder
<b>ESC</b>	Electronic Stability Control
<b>ETM</b>	Evasion Threat Metric
<b>FARS</b>	Fatality Analysis Reporting System
<b>FAST DASH</b>	FMCSA's Advanced System Testing utilizing a Data Acquisition System on the Highways
<b>FMCSA</b>	Federal Motor Carrier Safety Administration
<b>FOT</b>	Field Operational Test
<b>FSM</b>	Fuzzy Safety Model
<b>GIDAS</b>	German In-Depth Accident Study
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GSN</b>	Goal Structuring Notation

<b>HiL</b>	Hardware-in-the-Loop
<b>IDM</b>	Intelligent Driver Model
<b>IFTD</b>	In-Vehicle Fallback Test Driver
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>KBA</b>	Kraftfahrt-Bundesamt
<b>KS</b>	Kolmogorov-Smirnov
<b>LIP</b>	Lane Intrusion Point
<b>LKW</b>	Lastkraftwagen
<b>MiL</b>	Model-in-the-Loop
<b>MVP</b>	Minimum Viable Product
<b>NDD</b>	Naturalistic Driving Data
<b>NDS</b>	Naturalistic Driving Studies
<b>NGSIM</b>	Next Generation Simulation
<b>NHTSA</b>	National Highway Traffic Safety Administration
<b>NIEON</b>	Non-Impaired and Eyes ON the conflict
<b>NLP</b>	Natural Language Processing
<b>NMVCCS</b>	National Motor Vehicle Crash Causation Survey
<b>OBMS FOT</b>	Onboard Monitoring Systems Field Operational Test

<b>ODD</b>	Operational Design Domain
<b>OEDR</b>	Object and Event Detection and Response
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer
<b>OSI</b>	Open Simulation Interface
<b>PAS</b>	Publicly Available Specification
<b>PCM</b>	Pre-Crash Matrix
<b>PEGASUS</b>	Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen
<b>PFS</b>	Proactive Fuzzy Surrogate Safety Metric
<b>PKW</b>	Personenkraftwagen
<b>RMSE</b>	Root Mean Squared Error
<b>ROS</b>	Robot Operating System
<b>RSS</b>	Responsibility Sensitive Safety
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers
<b>SAFe</b>	Scaled Agile Framework
<b>SCM</b>	Stochastic Cognitive Driver Model
<b>SDL</b>	Scenario Description Language
<b>SHRP2</b>	Second Strategic Highway Research Program

<b>SiL</b>	Software-in-the-Loop
<b>SOTIF</b>	Safety of the intended functionality
<b>SQP</b>	Sequential Quadratic Programming
<b>SSM</b>	Surrogate Safety Metric
<b>StVG</b>	Straßenverkehrsgesetz
<b>SuT</b>	System under Test
<b>THW</b>	Time Headway
<b>TTC</b>	Time To Collision
<b>VDA</b>	Verband der Automobilindustrie e.V.
<b>ViL</b>	Vehicle-in-the-Loop
<b>VVM</b>	Verifikations- und Validierungsmethoden automatisierter Fahrzeuge im urbanen Umfeld
<b>XiL</b>	X-in-the-Loop
<b>XML</b>	Extensible Markup Language



# A Anhang

## A.1 Parameter der ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157

**Tabelle A.1:** Parameter der ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [141] - Betriebsbedingungen

Kategorie	Typ	Name	Beschreibung
Betriebsbedingungen	Straße	Spuranzahl	Anzahl der parallelen, nebeneinander liegenden Fahrspuren in der gleichen Fahrtrichtung
		Fahrstreifenbreite	Breite der einzelnen Fahrstreifen
		Fahrbahnzustand	Fahrbahnzustand bezogen auf den Reibungskoeffizienten (trocken, nass, vereist, Schnee, neu, abgenutzt)
Umweltbedingungen		Fahrbahnmarkierungen	Art, Farbe, Breite, Sichtbarkeit der Fahrbahnmarkierungen
		Lichtverhältnisse	Lichtmenge und -richtung
		Wetterbedingungen	Anzahl und Intensität von Wetterereignissen wie Wind, Regen, Schnee usw.

**Tabelle A.2:** Parameter der ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [141] - Anfangsbedingungen

Kategorie	Typ	Name	Beschreibung
Anfangsbedingungen	Anfangsgeschwindigkeit	$v_{e,0}$	Anfangsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs
		$v_{o,0}$	Anfangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs auf der Fahrspur des ALKS-Fahrzeugs oder der Nachbarspur
		$v_{f,0}$	Anfangsgeschwindigkeit des verdeckten Fahrzeugs im Ausscherszenario
	Anfangsabstand	$d_{x,0}$	Anfänglicher Längsabstand zwischen der vorderen Stoßstange des ALKS-Fahrzeugs und der hinteren Stoßstange des vorausfahrenden oder einscherenden Fahrzeugs (innerer Abstand)
		$d_{y,0}$	Anfänglicher seitlicher Abstand zwischen dem Ego-Fahrzeug und der Seite des einscherenden Fahrzeugs
		$d_{y,f,0}$	Anfänglicher seitlicher Abstand zwischen dem Ego-Fahrzeug und den Seiten des vorausfahrenden Fahrzeugs
		$d_{x,f,0}$	Anfänglicher Längsabstand zwischen dem vorausfahrenden und verdeckten Fahrzeug im Ausscherszenario
		$d_{f,y}$	Breite des verdeckten Fahrzeugs im Ausscherszenario
		$d_{o,y}$	Breite des vorausfahrenden Fahrzeugs
		$d_{o,x}$	Länge des vorausfahrenden Fahrzeugs

**Tabelle A.3:** Parameter der ALKS-Szenarien aus UN-Regelung Nr. 157 [141] - Fahrzeuggbewegung

Kategorie	Typ	Name	Beschreibung
Fahrzeuggbewegung	Seitliche Bewegung	$v_y$	Seitliche Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs
	Verzögerung	$G_{x,\max}$	Maximale Bremsbeschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs
		$dG/dt$	Verzögerungsrate (Ruck) des vorausfahrenden Fahrzeugs

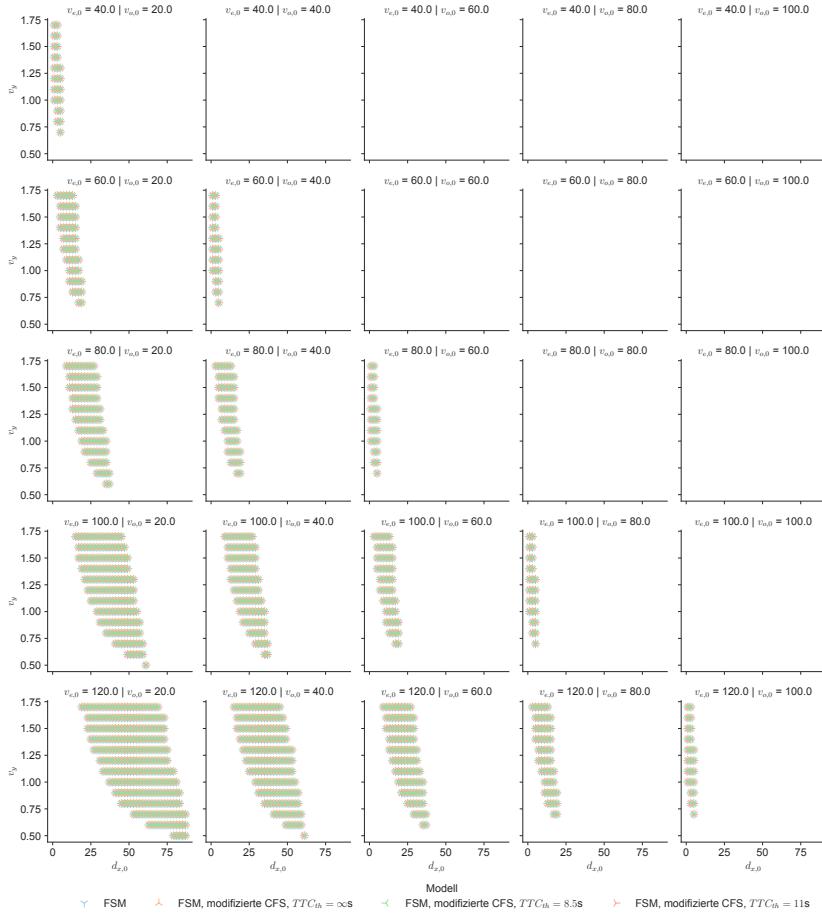
## **A.2 Vergleich der Kollisionsregionen für kombiniertes Einscher- und Bremsszenario**

Nachfolgend werden die Kollisionsbereiche des kombinierten Einscher- und Bremsszenarios für alle betrachteten Modellvarianten verglichen. Tabelle A.4 zeigt die vollständige Kontingenztafel der Kollisionsbereiche der Modellvarianten. Abb. A.1 bis Abb. A.8 veranschaulichen die Verteilung der Kollisionsbereiche der Modelle innerhalb des Parameterraums.

**Tabelle A.4:** Vollständige Kontingenztafel der Kollisionsbereiche der Modelle im Einscher- und Bremsszenario (C = Kollision, N = Keine Kollision)

		N				C				N				C					
		N		C		N		C		N		C		N		C			
		N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C		
		N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C		
		N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N	C		
FSM-8.5-mod		638959	9	54	0	39	2	364	0	0	761	1	0	20	13	640544			
FSM-11		0	14	0	76	38	0	0	12	8	21	0	38050	0	86	403	106988	145696	
FSM-11-mod																			
FSM-v2																			
FSM																			
N																			
C																			
<b><math>\Sigma</math></b>		638959	23	54	76	38	39	2	376	8	21	322	38811	1	86	423	107001	786240	

Beschleunigung Einscherer:  $0 \text{ ms}^{-2}$



**Abbildung A.1:** Einscher- & Bremsszenario mit  $G_{x,\max} = 0 \text{ m s}^{-2}$

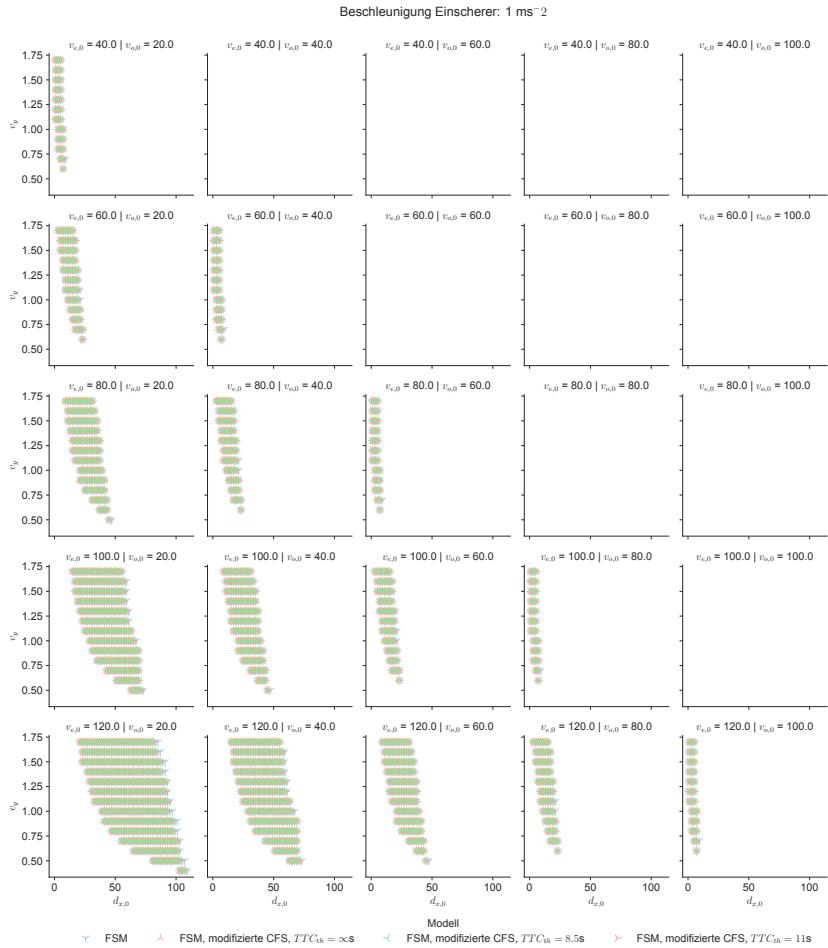
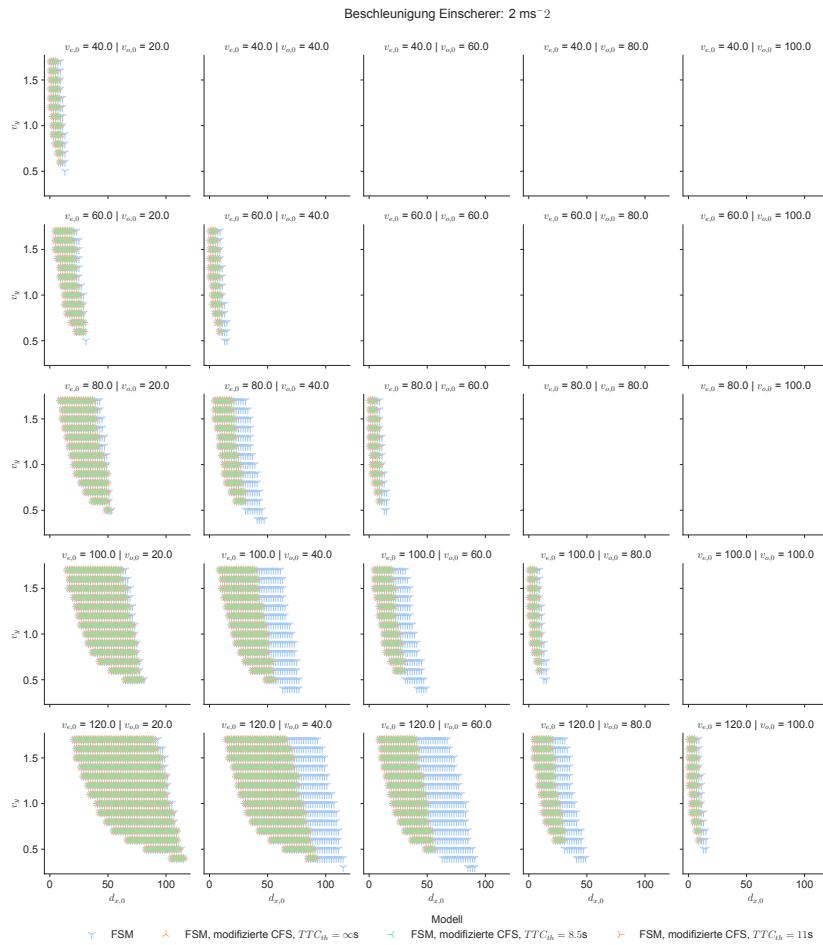


Abbildung A.2: Einscher- & Bremsszenario mit  $G_{x,\max} = 1 \text{ m s}^{-2}$



**Abbildung A.3:** Einscher- & Bremsszenario mit  $G_{x,\max} = 2 \text{ m s}^{-2}$

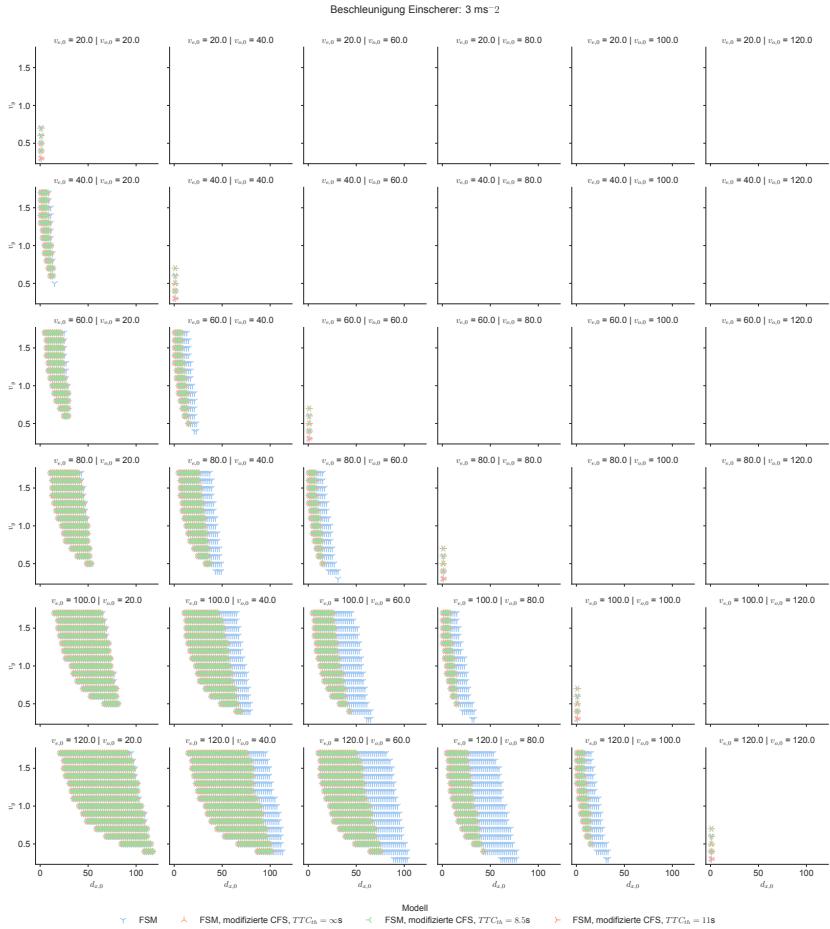
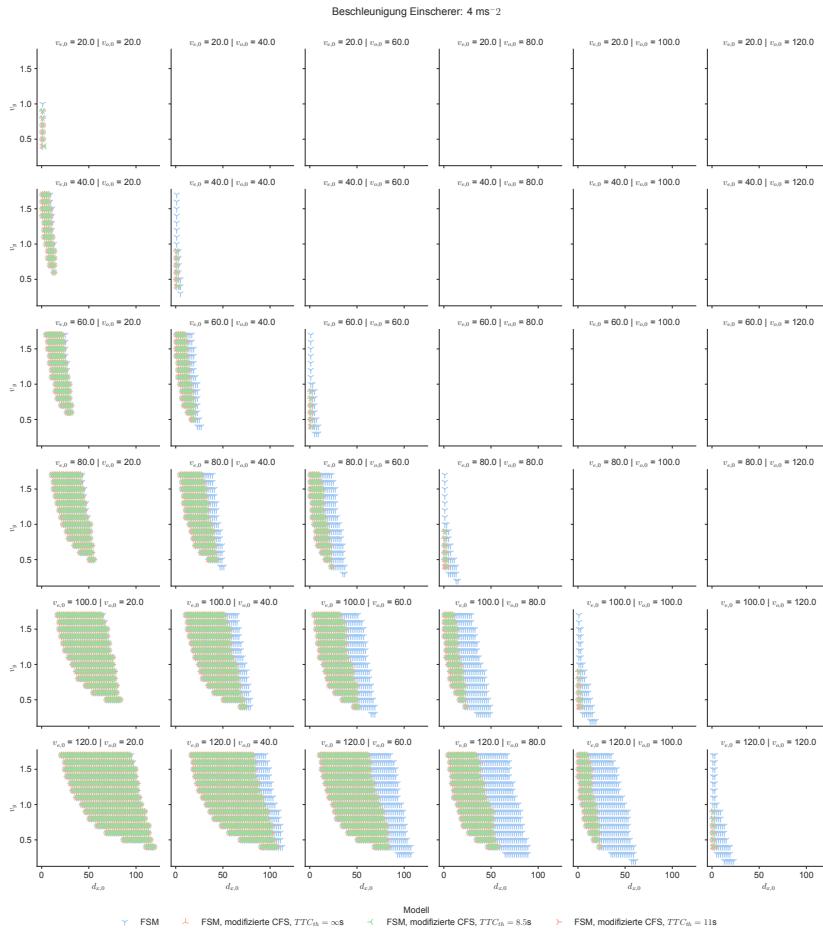
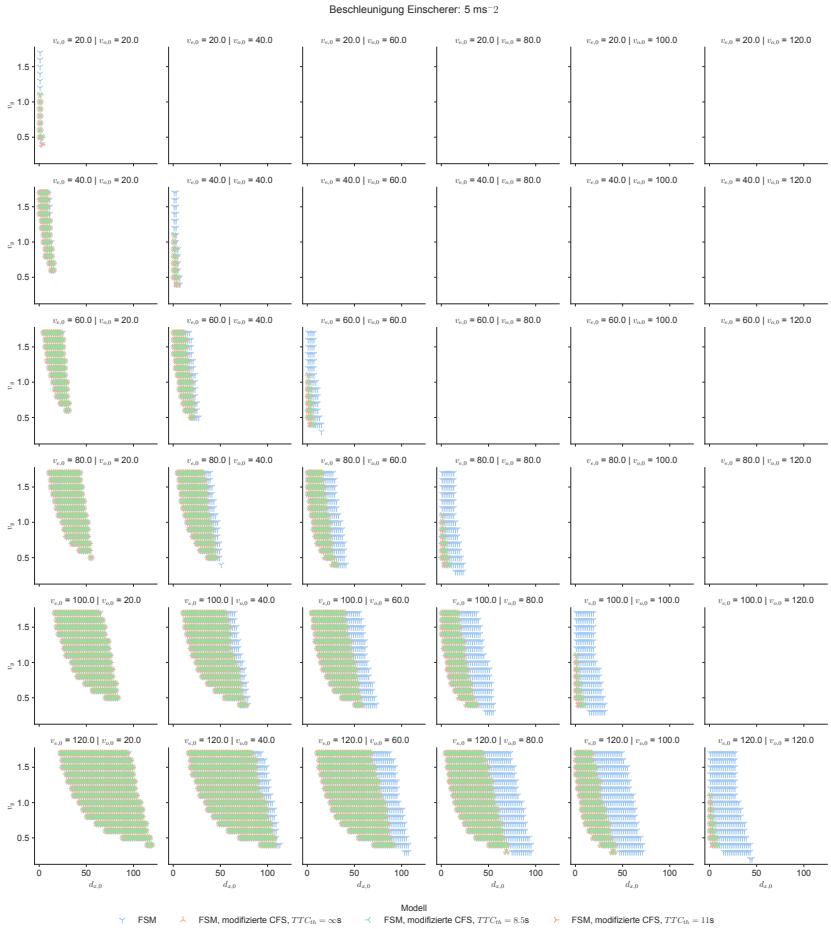


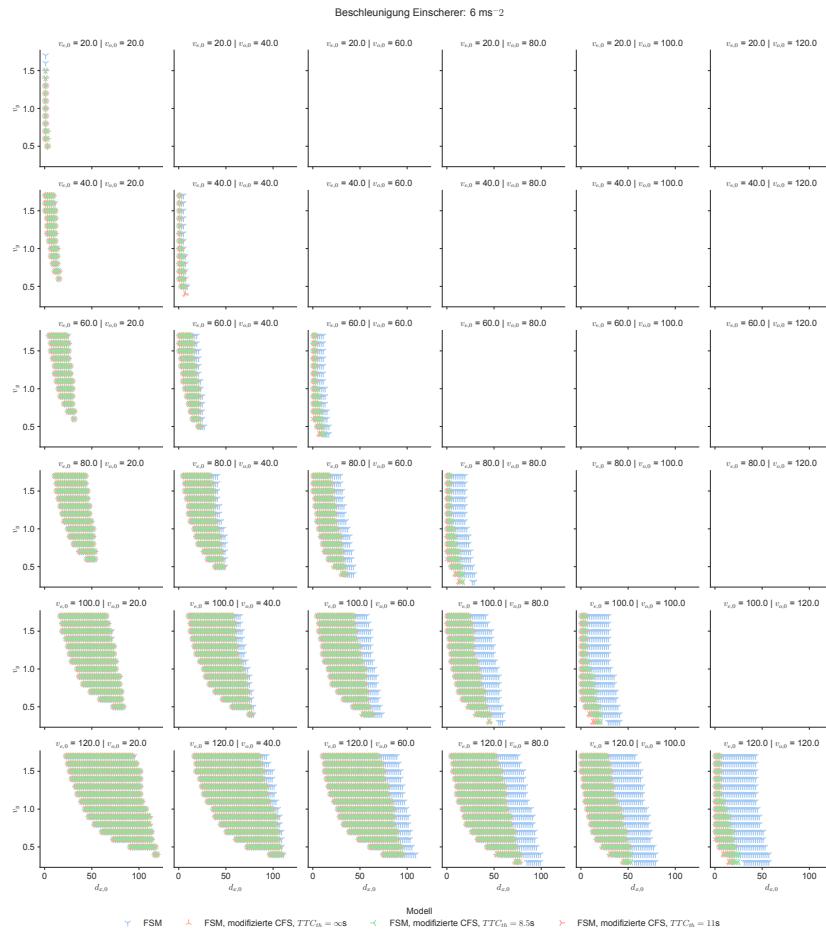
Abbildung A.4: Einscher- & Bremsszenario mit  $G_{x,\max} = 3 \text{ m s}^{-2}$



**Abbildung A.5:** Einscher- & Bremsszenario mit  $G_{x,\max} = 4 \text{ m s}^{-2}$



**Abbildung A.6:** Einscher- & Bremsszenario mit  $G_{x,\max} = 5 \text{ m s}^{-2}$



**Abbildung A.7:** Einscher- & Bremsszenario mit  $G_{x,\max} = 6 \text{ m s}^{-2}$

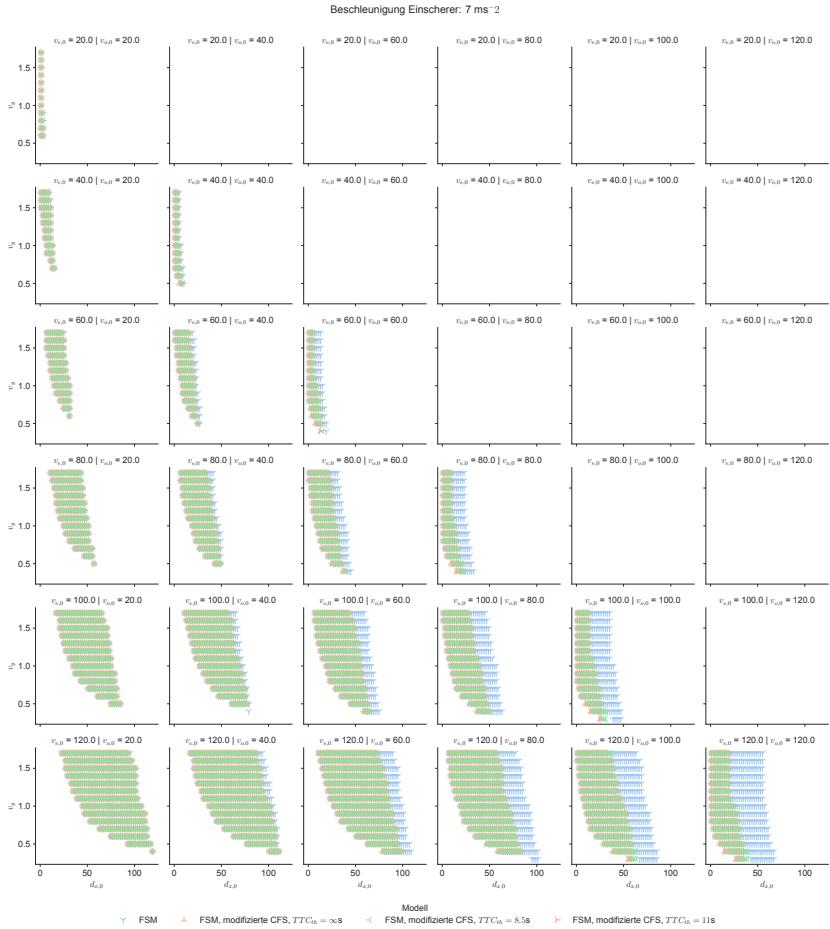


Abbildung A.8: Einscher- & Bremsszenario mit  $G_{x,\max} = 7 \text{ m s}^{-2}$

