

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

**Entwicklung einer Technik zur modellbasierten
Risikobewertung hochautomatisierter
Fahrfunktionen**

David Stefan Wittmann, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder

Die Dissertation wurde am 22.10.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 17.12.2019 angenommen.

Prognosen sind schwierig, besonders wenn
sie die Zukunft betreffen

(Niels Bohr)

Danksagung

Vielen Dank an alle, die dazu beigetragen haben die Zeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik und in der Vorentwicklung bei Audi so lehrreich, interessant und abwechslungsreich zu gestalten. Dies war die Grundlage für das Gelingen dieser Arbeit.

Besonders hervorheben möchte ich dabei Prof. Markus Lienkamp, der mir diese Arbeit ermöglicht und mich dabei immer unterstützt hat. Gleiches gilt für die fachliche Betreuung durch Dr. Diermeyer und Cheng Wang. Ein besonderer Dank gilt Karl-Heinz Siedersberger für die Schaffung der guten Rahmenbedingungen und die erfahrene Unterstützung bei Herausforderungen aller Art.

Vor allem möchte ich mich bei den Kollegen der Fahrerassistenzgruppe sowie des Projekthauses bedanken. Die intensiven fachlichen Diskussionen und gemeinsamen Erlebnisse sorgten für unschätzbare Impulse und Motivation, auch über die aktive Zeit hinaus.

Vielen Dank an die AUDI AG, die die Durchführung dieses Forschungsprojekts sowohl finanziell als auch inhaltlich ermöglicht hat.

Garching, im Juli 2019

David Wittmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Anforderungen an die Bewertungstechnik.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	4
2	Stand der Wissenschaft	5
2.1	Grundlagen der Risikobewertung.....	5
2.1.1	Einteilung von Bewertungsmethoden.....	5
2.1.2	Risikobewertungsmethoden.....	6
2.1.3	Begriffsdefinitionen.....	8
2.2	Methoden zur Risikobewertung von Fahrfunktionen.....	9
2.2.1	Risikobewertung nach ISO 26262.....	9
2.2.2	Prospektive Effektivitätsbewertung von FAS.....	10
2.2.3	Bewertungsmethoden für automatisierte Fahrfunktionen.....	11
2.2.4	Echtzeitriskoschätzung.....	12
2.3	Methoden der Risikobewertung in anderen Domänen.....	13
2.4	Kritik und Themenstellung.....	14
2.4.1	Kritik am Stand der Wissenschaft.....	14
2.4.2	Wissenschaftliche Fragestellungen.....	16
2.4.3	Wissenschaftlicher Beitrag.....	16
3	Vorgehen und Aufbau der modellbasierten Risikobewertung	17
3.1	Vorgehensweise zur Modellbildung.....	17
3.2	Technik der modellbasierten Bewertung.....	19
3.2.1	Aufbau des Bewertungsmodells.....	19
3.2.2	Formaler Szenarienraum.....	21
3.2.3	Abstraktionsebenen der Modellierung.....	22
3.2.4	Methodisches Vorgehen zur Erstellung und Bewertung.....	24
4	Formale Szenarienbeschreibung	27
4.1	Stand der Wissenschaft.....	27
4.1.1	Szenarienbeschreibung.....	27
4.1.2	Ähnlichkeitsmaße.....	30
4.2	Anforderungen und Lösungskonzept.....	32

4.3	Formale Szenarienbeschreibungssprache	32
4.3.1	Grammatik der Szenarienbeschreibung	33
4.3.2	Alphabet der Szenarienbeschreibung.....	34
4.4	Ähnlichkeitssuche im Szenarienraum	37
4.4.1	Ähnlichkeit der Elemente	39
4.4.2	Ähnlichkeit der Parameterbereiche.....	40
4.4.3	Ähnlichkeit der Verhaltensweisen	42
4.4.4	Ähnlichkeit des zeitlichen Szenarienablaufs.....	42
4.5	Bewertung der Beschreibungssprache	44
4.5.1	Umsetzung der Szenarienbeschreibung.....	44
4.5.2	Modellierte Szenarien	44
4.5.3	Ergebnisse der Ähnlichkeitssuche	47
4.5.4	Diskussion der Szenarienbeschreibung	48
5	Modellierung der Funktionsspezifikation	51
5.1	Stand der Wissenschaft	51
5.1.1	Textuelle Beschreibung.....	51
5.1.2	Formale Beschreibung	52
5.1.3	Verhaltensmodelle.....	52
5.2	Anforderungen und Lösungskonzept	53
5.3	Modellierung von Funktionsgrenzen	54
5.4	Modellierung von Systemverhaltensweisen	56
5.4.1	Abstraktion der Verhaltensbeschreibung.....	57
5.4.2	Verhaltenssteuerung	58
5.4.3	Modellierung des Beispielverhaltens	60
5.4.4	Modellierung von Fehlerverhalten.....	63
5.5	Bewertung der Funktionsmodellierung	64
5.5.1	Bewertung der Funktionsgrenzen	64
5.5.2	Bewertung der Systemverhaltensweisen.....	65
5.5.3	Diskussion der Funktionsmodellierung	67
6	Modellierung von Risiken	69
6.1	Stand der Wissenschaft	69
6.1.1	Risikoberechnung.....	69
6.1.2	Risikomodelle	70
6.1.3	Szenarienwahrscheinlichkeiten.....	72
6.1.4	Kollisionswahrscheinlichkeit.....	73
6.1.5	Schadensschwere	74

6.2	Anforderungen und Lösungskonzept	75
6.3	Risikoberechnung und Modellierung	77
6.4	Abschätzung und Modellierung von Szenarienhäufigkeiten	80
6.4.1	Klassifikation von Szenarien in Messdaten	81
6.4.2	Ermittelte Szenarienhäufigkeiten	82
6.4.3	Abschätzung der Häufigkeit von kritischen Ereignissen	83
6.4.4	Wahrscheinlichkeiten von Szenarienparametern	84
6.5	Berücksichtigung des Systemverhaltens	88
6.5.1	Berücksichtigung unterschiedlicher Verhaltensmöglichkeiten	88
6.5.2	Berücksichtigung von Nominal- und Fehlverhalten	89
6.6	Modellierung der Kollisionswahrscheinlichkeit	90
6.6.1	Identifikation und Abschätzung von Einflussfaktoren	90
6.6.2	Qualitative und semiquantitative Kollisionsmodellierung	90
6.6.3	Quantitative Modellierung von relevanten Zusammenhängen	91
6.7	Schadens- und Verletzungsrisikofunktionen	93
6.8	Bewertung der Risikomodellierung	94
6.8.1	Exemplarische Risikomodelle	94
6.8.2	Evaluation der Risikomodellierung	97
6.8.3	Diskussion der Risikomodellierung	98
7	Ergebnisse und Validierung Gesamtmodell	99
7.1	Zusammenfügen der Modellbestandteile	99
7.2	Ergebnisse	100
7.3	Validierung	101
7.4	Diskussion	103
8	Zusammenfassung und Ausblick	105
8.1	Zusammenfassung	105
8.2	Ausblick	106
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis	v
	Literaturverzeichnis	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xix
	Anhang	xxi

Abkürzungsverzeichnis

AD	Anderson Darling Test
AIS	Abbreviated Injury Scale [1, S. 51] (vereinfachte Verletzungsskala)
ALARP	As Low As Reasonable Practicable (Risikoprinzip: so gering wie vernünftigerweise praktikabel)
APRL	Automotive Performance Risk Level (automobiler Restrisikolevel)
ASIL	Automotive Safety Integrity Level (automobiler Sicherheitsintegritätslevel)
A_R	Anforderung an Risikomodellierung
A_S	Anforderung an den Szenarienraum
A_V	Anforderung an Verhaltensmodellierung
C	Controllability (Kontrollierbarkeit)
CCA	Cause-Consequences-Analysis
CL	Concretion level (Konkretisierungslevel)
E	Exposure (Ausgesetztsein)
EES	Equivalent Energy Speed [1, S. 44]
ETA	Event Tree Analysis (Ereignisbaumanalysen)
FHA	Functional Hazard Analysis (Funktionale Gefährdungsanalyse)
FS	Fahrstreifen
FSW	Fahrstreifenwechsel
FTA	Fault Tree Analysis (Fehlerbaumanalyse)
Fzg	Fahrzeug
GAMAB	Globalement Au Moins Aussi Bon (Risikoprinzip: mindestens genauso gut)
GQ	Gefährdungsquelle
G&R	Gefahrenanalyse und Risikobewertung
HAV	Highly automated vehicle (Hochautomatisiertes Fahrzeug): Fahrzeug mit aktiver automatisierter Fahrfunktion der SAE Level 3 bis 5
HAZOP	Hazard And Operability Analysis (PAAG-Analyse)
HSDL	Hierachical Scenario Description Language (hierarchische Szenarienbeschreibungssprache)
IM	Initiierender Mechanismus einer Gefährdung
ISS	Injury Severity Score [1, S. 51] (Verletzungsschwereskala)
MA	Markov Analyse
MAIS	Maximum AIS
MEM	Minimum Endogenous Mortality (Risikoprinzip der minimalen endogenen Sterblichkeit)
MC	Monte-Carlo (Simulation)
KS	Kolmogorov Smirnov Test
NDS	Naturalistic driving studies (Realfahrstudien)
ODD	Operational Design Domain (Anwendungsbereich der HAV-Funktion)
PHA	Preliminary Hazard Analysis (vorbereitende Gefährdungsanalyse)
PHL	Preliminary Hazard List (vorbereitende Gefährdungsliste)

Abkürzungsverzeichnis

PNA	Petrinetz Analysen
PODS	Probability of Death Score [1, S. 52] (Todeswahrscheinlichkeitsskala)
QQ-Plot	Quantile quantile Plot
RA	Risikoabhängigkeitslevel
S	Severity (Schadensschwere)
SHA	System Hazard Analysis (Systemgefährdungsanalyse)
STAMP	Systems-Theoretic Accident Model and Process
STPA	Systems Theoretic Process Analysis
SZG	resultierenden Schadensschwere eines betroffenen Ziels aufgrund der Gefahr
UML	Unified Modeling Language

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$A()$	Par. abhängig	Integral (Fläche) des erlaubten Parameterbereichs
a_{br}	m/s ²	Angenommene Verzögerung eines Verkehrsteilnehmers
$a_{ca,min}$	m/s ²	Maximale Verzögerung zur Reduktion von Relativgeschwindigkeiten
a_{ego}	m/s ²	Beschleunigung des HAV
a_{min}	m/s ²	Minimale Beschleunigung (maximale Verzögerung) des HAV
a_{rel}	m/s ²	Relativbeschleunigung
a_{VF}	m/s ²	Beschleunigung des Vorderfahrzeugs
$a_{y,curv,max}$	m/s ²	Maximale Querbeschleunigung für Kurvenfahrten
$a_{y,max}$	m/s ²	Maximale Querbeschleunigung beim Ausweichen
$childs()$	-	Menge aller Kind-Elemente
b	-	Verhalten in der Szenarienbeschreibung
bc	ScSp	Szenarienbedingung einer Systemverhaltensweise
Bc	bc	Menge aller Bedingungen einer Systemverhaltensweise
be	-	Verhaltensweise eines Elements in einem Szenario
bm	-	Modell einer Verhaltensweise der Funktion
$bSet$	b	Set aller Verhaltensweisen eines Szenarios
β_0, β_1	-	Parameter der logistischen Regression
C	-	Kollision als Klasse für Unfalltyp und Unfallart
Corr	-	Pearsonscher Korrelationskoeffizient
Cov	-	Kovarianz
D	€	Schaden bzw. Schadenskategorie
d_x	m	Abstand zu einem Objekt in x-Richtung
$d_{x,det,curv}$	m	Erkennungsreichweite für Kurvenradien
$d_{det,obj}$	m	Erkennungsreichweite für Objekte
d_{min}	m	Akzeptierter minimaler Abstand
$d_{x,ca}$	m	Erkennungsreichweite für Objekte auf Nachbarfahrstreifen
δ_{sc}	-	Abdeckungsfaktor zur Berücksichtigung von überlappenden Szenarien
δ_{rm}	-	Abdeckungsfaktor zur Berücksichtigung von überschneidenden Risikomodellen
Δv	m/s	Geschwindigkeitsänderung im Stoß
Δx	m	Abstand in Fahrzeuglängsrichtung
el	-	Element eines Szenarios

Formelzeichen

Ev	-	Kritisches Ereignis
ev	-	Ereignisse eines Szenarios
$excl$	id	Ausschlussbeziehung zu einer anderen Verhaltensweise
$f(.)$		Wahrscheinlichkeitsverteilung
f_k	-	Ähnlichkeitsfunktion zwischen Ereignissen
f_{pSc}	-	Parameterwahrscheinlichkeitsverteilung
$isconcr$	id	Konkretisierungsbeziehung zwischen Verhaltens- oder Risikomodellen
$isspec$	id	Spezialisierungsbeziehung zwischen Verhaltens- oder Risikomodellen
k	-	Stoßzahl
κ	-	Kurvenkrümmung
L	-	Formale Sprache
λ_{MD}	1/h	Aus Messdaten abgeleitete mittlere Auftretensrate
λ_{SHRP2}	1/h	Aus SHRP2 abgeleitete mittlere Auftretensrate
m	kg	Masse
ODD_{IN}, ODD_{OUT}	-	Mengen von Szenarien die innerhalb, außerhalb oder am Rand der funktionalen Domäne liegen
ODD_{BOUND}		
$P(.)$	-	Wahrscheinlichkeit
pa	-	Parameter eines Elements oder einer Verhaltensweise
$prio$	-	Priorität der Verhaltensweise
$pSet$	pa	Set aller Parameter eines Szenarios
R	€/h	Gesamtrisiko
$R(.)$	-	Rang
$\overline{R(\)}$	-	Mittlere Rangzahl
$RefEl$	el	Referenziertes Element
rc	$ScSp$	Szenarienbedingung eines Risikomodells
Rc	rc	Menge aller Szenarienbedingungen eines Risikomodells
Σ	-	Alphabet einer Sprache
Σ^*	-	Alle möglichen Zeichenreihen über einem Alphabet Σ
Sb	-	Beschreibung der Systemverhaltensweise
sc	$ScSp$	Szenario im Szenarienraum
sc_s	$ScSp$	Szenario im Szenarienraum für das ähnliche Szenarien gesucht werden
sc_f	$ScSp$	Zu einem gesuchten Szenario potenziell passende Szenarien
sim	-	Ähnlichkeitsmaß
sm	$ScSp$	Szenarienmodifikation durch zugeordnete Systemverhaltensweise
Sm	sm	Menge aller Szenarienmodifikationen einer Verhaltensweise
spe	-	Spezialisierungsmaß
St	-	Zustand (state)
T_g	s	Zeitlücke zum Vorderfahrzeug
$T_{lat,curv}$	s	Erkennungslatenz für Kurvenradien
T_{min}	s	Akzeptierte minimale Zeitlücke
t_{react}	s	Angenommene Reaktionszeit von Verkehrsteilnehmern

T_{sys}	s	Latenzzeit des Systems
Var	-	Varianz
v	m/s	Geschwindigkeit
v_{ego}	m/s	Geschwindigkeit des HAV
v_{rel}	m/s	Relativgeschwindigkeit
$v_{rel,min}$	m/s	Minimale akzeptierte Relativgeschwindigkeit zu langsameren Objekten
$v_{x,limit,max}$	m/s	Geschwindigkeitsbegrenzung
$w_{EL}, w_{Pa}, w_{Be}, w_{Ev}$	-	Gewichtungsfaktoren für Ähnlichkeiten der Szenarienaspekte
W	€	Gewichtungsfaktor für Schäden
x_e	m	x-Position Hindernis
y_e	m	Ausweichablage eines Hindernisses

1 Einleitung

1.1 Motivation

Automatisiertes Fahren ist aktuell eines der großen Themen in der Automobilbranche. Sowohl die klassischen Fahrzeughersteller als auch neue Wettbewerber arbeiten intensiv an der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen. Diese Systeme müssen sicher und nachvollziehbar gestaltet sein.

Automatisiertes Fahren lässt sich nach den gängigen Definitionen der BAST [2, S. 9] und SAE [3, S. 17] in die Level 0 bis 5 einteilen. Diese Einteilung bezieht sich nur auf kontinuierlich eingreifende Systeme. Für rein warnende oder kurzfristig-intervenierende Systeme ist eine andere Kategorisierung sinnvoller [4]. Ein entscheidender Unterschied ergibt sich zwischen den Leveln 2 und 3. In den Leveln 0 bis 2 muss der Fahrer das System dauerhaft überwachen, ab Level 3 wird diese Aufgabe vom System übernommen. Während es bereits zahlreiche Level 2 Systeme im Markt gibt, existieren für die Einführung von höheren Automatisierungsgraden noch zahlreiche Herausforderungen und dementsprechend werden in dieser Arbeit Systeme mit den Leveln 3 bis 5 adressiert. Analog zu [5, S. 10] wird im Folgenden die Abkürzung HAV („highly automated vehicle“ [5, S. 10]) für Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen der Level 3 bis 5 verwendet.

Durch das Entbinden des Fahrers von seiner Überwachungsaufgabe wird diesem erstmalig die Fahraufgabe vollständig abgenommen und er kann sich Nebentätigkeiten widmen. Allerdings steht der Fahrer dadurch nicht mehr dauerhaft als Korrektiv zur Verfügung. Bei Systemen mit geringer Automatisierung (Level 0 bis 2) war vor allem die große Streuung der Fahrfähigkeiten zwischen den Fahrern und deren aktuelle Zustände für Risiken verantwortlich. Aus Sicherheitsaspekten mussten in erster Linie schwer beherrschbare technische Fehler der Akteure berücksichtigt werden. Beim hochautomatisierten Fahren sind das gesamte Funktionsverhalten und die Interaktion im Verkehr direkt relevant. Teilweise kann Fehlverhalten noch durch die umliegenden Verkehrsteilnehmer ausgeglichen werden, aber grundsätzlich spiegeln sich Schwächen des Systems direkt in der Unfallstatistik wider.

Aus diesem Grund muss die Sicherheit solcher Systeme ein entscheidendes Designkriterium bei der Funktionsauslegung sein. Die Risiken verschieben sich bei HAV von schwer beherrschbaren Fehlern und der Fahrerinteraktion zum Funktionsverhalten über den gesamten Betriebsbereich. Dadurch ergibt sich eine enorme Szenarienvielfalt, die bei der Sicherheitsbewertung berücksichtigt werden muss. Zusätzlich hängen die relevanten Szenarien direkt von der aktuellen Funktionsausprägung sowie deren Fähigkeiten ab.

Neben der Szenarienvielfalt ist bei HAV auch das gewünschte Systemverhalten komplexer. Das hat zur Folge, dass dieses schwerer von Anfang an definiert werden kann und demnach während der Entwicklung noch angepasst wird. Dazu kommt die Verwendung von Techniken wie maschinellem Lernen, das zu nicht analysierbarem und unvorhersehbarem Verhalten

führen kann [6, S. 659]. Umso relevanter wird es, den Verhaltensspielraum solcher Techniken nachvollziehbar eingrenzen zu können.

Für HAV liegen noch keine ausreichenden Erfahrungen im Verkehrsgeschehen vor. Bisher existieren lediglich eine wachsende Menge von Testfahrten, durchgeführt mit Sicherheitsfahrern. Demnach sind nicht alle Risiken a priori bekannt, vor allem da viele davon erst durch seltene Szenarien und der Interaktion mit dem Systemverhalten entstehen.

Trotz dieser Herausforderungen müssen in der Konzeptphase von HAV die Entscheidungen über das Systemverhalten und die Systemfähigkeiten getroffen werden. Dabei muss ein sinnvoller und verantwortungsvoller Kompromiss zwischen Sicherheit, Kundennutzen und Machbarkeit gefunden werden, wobei diese drei Kategorien bei HAV besonders stark von der Funktionsdefinition abhängen. In Anlehnung an das in der Verkehrssicherheit anerkannte Risikoakzeptanzmodell „As low as reasonably practicable“ (ALARP) [7, S. 175] muss das Risiko, soweit sinnvollerweise möglich, reduziert werden. Für die Anwendung solcher Prinzipien sind gesellschaftlich akzeptierte Grenzwerte für Restrisiken notwendig, deren Definition nicht Kern dieser Arbeit ist. Eine entscheidende Grundlage dafür ist, die Risiken der aktuellen Funktionsdefinition abschätzen zu können, um die Wahl einer risikoarmen Funktionsausprägung zu ermöglichen. Die Entwicklung einer solchen Methodik zur Bewertung der Risiken von HAV bereits während der frühen Entwicklungsphase und unter den neuen Herausforderungen des automatisierten Fahrens ist das Ziel dieser Arbeit.

1.2 Anforderungen an die Bewertungstechnik

Um die im vergangenen Kapitel dargelegten Herausforderungen bei der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen meistern zu können, wird eine Bewertungsmethodik benötigt. Zur präziseren Beschreibung der Problemstellung werden im Folgenden die Anforderungen an die Bewertungsmethodik detailliert [8].

Generell soll die Methodik auf die Bewertung von hochautomatisierten Fahrfunktionen eingeschränkt werden. Da ab dem Automationslevel 3 der Fahrer zum ersten Mal nicht mehr dauerhaft zur Verfügung steht, ergeben sich zahlreiche neue Herausforderungen bei der Risikobewertung. Deshalb wird der Fokus der neuen Methodik auf die Automationslevel 3, 4 und 5 gelegt. Die Interaktion mit dem Fahrer ist zwar bei Level 3 noch ein entscheidender Faktor und eine mögliche Gefahrenquelle, aufgrund der zahlreichen Forschungsarbeiten zu diesem Thema [9, 10] wird die Fahrerinteraktion in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Sicherheit muss bereits in der Konzeptphase von Systemen berücksichtigt werden [11, S. 1]. Deshalb soll die Methodik als Werkzeug bereits während der frühen Konzeptentwicklung einsetzbar sein. In dieser Phase werden die meisten Szenarien und Risiken identifiziert, die sich aber aufgrund ungenügend detaillierter Funktionsdefinitionen noch nicht quantifizieren lassen. Um eine möglichst vollständige Bewertung zu erreichen, ist eine Integration dieses Wissen notwendig.

Anforderung A1: *Abstrakte, qualitative Bewertungen und Abschätzungen müssen modelliert werden können.*

Als Grundlage für konkreten Auslegungsentscheidungen sind detaillierte Bewertungen notwendig. Deshalb müssen diese frühen Bewertungen parallel zur Funktionsdefinition konkretisiert werden.

Anforderung A2: *Bestehende Bewertungsmodelle müssen iterativ präzisiert und konkretisiert werden können, wenn detailliertere Informationen dazu vorliegen.*

Da während der Konzeptphase die Funktion noch nicht abschließend und ins letzte Detail definiert ist, soll die Bewertung in Abhängigkeit von der Funktionsauslegung modelliert werden. Dadurch können die Auswirkungen von Auslegungsentscheidungen auf die Risiken berücksichtigt werden.

Anforderung A3: *Die Bewertung muss in Abhängigkeit von der Funktionsdefinition (sowohl Funktionsgrenzen als auch Systemverhalten, aber ohne Fahrereingriff) geschehen, um die Auswirkungen von Änderungen automatisch bewerten zu können.*

Unfälle können durch Fehler und unzureichende Leistungsfähigkeit des Systems entstehen. Für eine ganzheitliche Bewertung müssen demnach Risiken aufgrund funktionaler Unzulänglichkeiten und aufgrund von Systemfehlern berücksichtigt werden, weil beide Bereiche einen entscheidenden Einfluss auf die Sicherheit des Gesamtsystems haben können.

Anforderung A4: *Sowohl alle Risiken durch die begrenzte Systemleistungsfähigkeit als auch durch Fehlfunktionen der automatisierten Fahrfunktion müssen bewertet werden können.*

Bei der Entwicklung von Systemen müssen aus Gebrauchssicherheitsgründen der Stand der Technik und damit Normen, wie in diesem Fall z.B. die ISO26262 [12], eingehalten werden. Deshalb soll die entwickelte Methodik für diesen Prozess nutzbar sein und dementsprechend zur Erzeugung einer Gefahrenanalyse und Risikobewertung (G&R) verwendet werden können.

Anforderung A5: *Um als Grundlage für eine ISO26262 kompatible G&R dienen zu können, muss die Methodik kompatibel zu den bestehenden Methoden und Normen sein.*

Eine der großen Herausforderungen beim automatisierten Fahren ist die zu berücksichtigende Szenarienvielfalt. Aufgrund der Komplexität des Straßenverkehrs und der HAV gibt es unzählige Einflussfaktoren, deren Kombination zu einer großen Menge an relevanten Szenarien führt. Diese Vielfalt muss beschrieben und bewertet werden können.

Anforderung A6: *Es werden Ansätze benötigt, um die Szenarienvielfalt modellierbar und beherrschbar zu machen. Dazu müssen alle relevanten Szenarien dargestellt und bereits berücksichtigte Szenarien zugeordnet werden können. Darüber hinaus müssen mehrere Verhaltensoptionen des HAV und die daraus resultierenden Risiken als Teil dieser Vielfalt berücksichtigt werden.*

Prospektive Risikobewertungen beruhen grundsätzlich auf einer Reihe von Annahmen. Um als Grundlage für den Sicherheitslebenszyklus [13] und für Auslegungsentscheidungen dienen zu können, muss die Risikobewertung plausibel und nachvollziehbar sein.

Anforderung A7: *Die Bewertungen müssen nachvollziehbar und die entsprechenden Annahmen müssen erkennbar sein.*

In der frühen Entwicklungsphase können einige Risiken nur grob abgeschätzt werden. Um eine risikogewichtete Optimierung des Systems zu ermöglichen, dürfen Risiken nicht aufgrund von Ungenauigkeiten unterschätzt werden.

Anforderung A8: *Die Bewertungen müssen plausibel sein, bei Unsicherheiten muss das Risiko entsprechend überschätzt werden.*

Um die Funktionen kontinuierlich verbessern zu können, müssen auch die Erkenntnisse der Risikobewertung weiterentwickelt und verbessert werden. Dabei ist einerseits die Erstellung als auch die Handhabbarkeit bezüglich Bewertungen, Dokumentation und Übertragbarkeit auf Nachfolgeprojekte herausfordernd.

Anforderung A9: Die durchgeführten Bewertungen und entwickelten Modelle müssen zur Erstellung einer erweiterbaren und anpassbaren Wissensbasis beitragen, die auch modulare Anpassungen von Szenarien, Verhalten oder Risiken ermöglicht.

Zur Plausibilisierung der definierten Anforderungen werden diese mit den Anforderungen für vergleichbare Problemstellungen in [14, S. 61] und [10, S. 61] verglichen (A.1). Dabei zeigt sich, dass lediglich Anforderungen bezüglich Fahrerverhalten und akzeptablem Restrisiko fehlen, die aufgrund des eingeschränkten Betrachtungsumfangs nicht relevant sind.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit orientiert sich am wissenschaftlichen Standardaufbau beginnend mit dem Stand der Wissenschaft, gefolgt vom Vorgehen und der Lösungsbildung sowie der abschließenden Bewertung. Da die entwickelte Technik auf dem Zusammenfügen von den drei eigenständigen Modellaspekten basiert, wird dieser Aufbau auch in den entsprechenden Detail-Kapiteln 4, 5 und 6 angewendet.

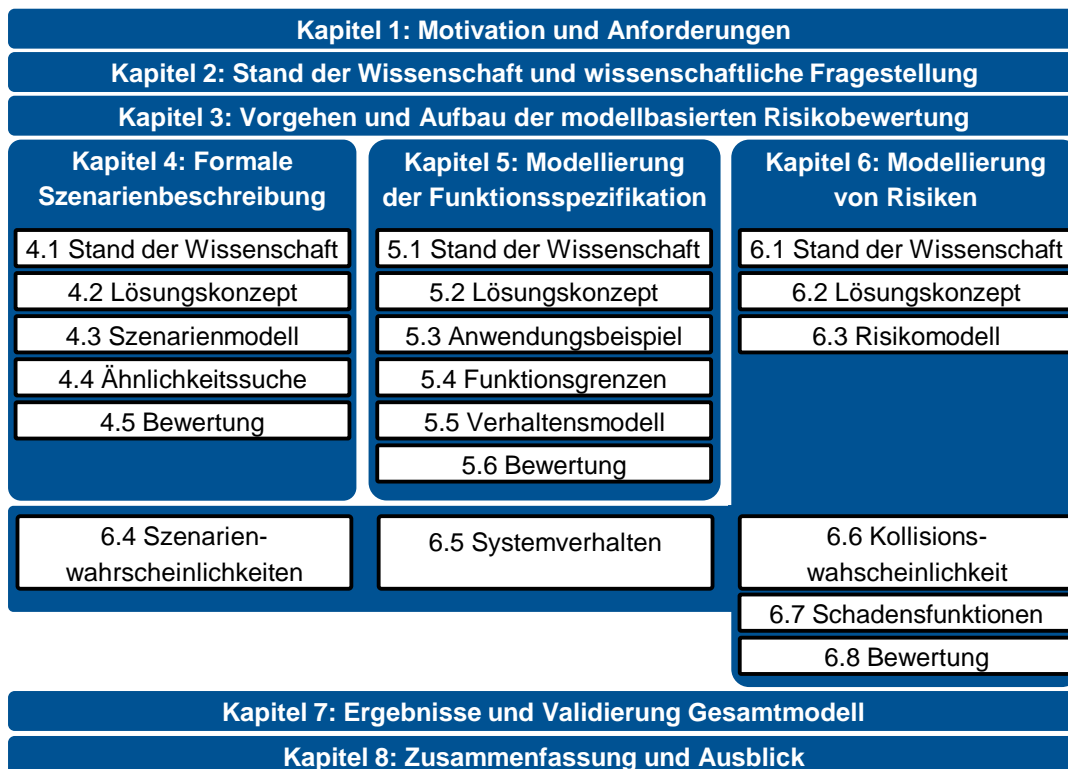


Abb. 1.1: Schematischer Aufbau der Arbeit

2 Stand der Wissenschaft

Die Bewertung von Risiken technischer Systeme ist ein weites Forschungsfeld und hat spätestens mit der Einführung der ISO 26262 [13] auch Einzug im Automobilbereich gehalten. In den folgenden Abschnitten wird die Vielfalt der Bewertungsmethoden strukturiert, bevor die benötigten Begriffe definiert und die Grundlagen der Risikobewertung dargelegt werden. Anschließend werden relevante Bewertungsmethoden für die vorliegende Problemstellung vorgestellt und analysiert. Abschließend wird die detaillierte Themenstellung aus der Kritik am Stand der Technik abgeleitet. Die relevanten Veröffentlichungen zu den Einzelbestandteilen der Methodik werden jeweils zu Beginn der entsprechenden Kapiteln 4, 5, und 6 dargestellt.

2.1 Grundlagen der Risikobewertung

2.1.1 Einteilung von Bewertungsmethoden

Bei der Entwicklung von Assistenzsystemen müssen die teils konträren Kriterien Risiko, Nutzen und Machbarkeit berücksichtigt werden. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Bewertung des Risikos. Allerdings können die anderen Kriterien durch Erstellung geeigneter Bewertungsmodelle ebenfalls in die entwickelte Methodik integriert werden.

Bewertungsmethoden können auch nach dem Bewertungszeitpunkt unterschieden werden. Bei der Bewertung von Sicherheitsassistenzfunktionen werden retrospektive und prospektive Methoden unterschieden [15, S. 16]. Bei den prospektiven Methoden wird die Effektivität vor der Systemeinführung abgeschätzt, bei den retrospektiven Methoden wird nach der Systemeinführung der Einfluss auf das Unfallgeschehen untersucht, sobald repräsentative Daten vorliegen. Diese Einteilung ist auf das hier vorliegende Problem übertragbar. Da beim angestrebten Einsatzzeitpunkt der Methodik in der Konzeptentwicklung noch keine umfangreichen Felddaten vorliegen können, scheiden retrospektive Analysen aus. Im Bereich des automatisierten Fahrens werden zusätzlich Ansätze entwickelt, um das aktuell erwartete Risiko bei der Planung des Fahrverhaltens zu berücksichtigen. Demnach gibt es noch die Kategorie Echtzeitbewertung, deren Methoden hier ebenfalls betrachtet werden.

Als Bewertungsgrundlage für Risikobewertungen können statistische Daten, Expertenmeinungen, Modelle oder Versuchsergebnisse verwendet werden. Je nach Bewertungszeitpunkt sind jedoch nicht alle Bewertungsgrundlagen möglich. So ist die Verwendung von statistischen Daten aus dem Feld per Definition nur bei retrospektiven Betrachtungen möglich. Bei der hier angestrebten prospektiven Bewertung können diese nicht verwendet werden.

Ein entscheidendes Unterscheidungsmerkmal ist die Genauigkeit der Bewertung. So können rein qualitative Bewertungen sowie unterschiedlich präzise quantitative Bewertungen unterschieden werden. Sicherheitsanalysen werden häufig noch in die Kategorien induktiv und deduktiv unterteilt. Die aus der Logik stammenden Begriffe bezeichnen bei der

Sicherheitsanalyse das Schließen von einer konkreten Gefahr auf die möglichen Ursachen auf Komponentenebene (deduktiv) bzw. ausgehend von Komponentenfehlern das Abschätzen von möglichen Konsequenzen (induktiv) [16, S. 63].

Die zugrundeliegenden Regeln und Methoden der Risikobewertung ähneln sich in den meisten Bereichen. Dennoch gibt es häufig je nach Bewertungsgegenstand spezifische Anpassungen und unterschiedlich umfangreiche Standards. Ihren Ursprung haben viele der Risikobewertungsmethoden in der Luftfahrt und im Anlagenbau.

Abschließend ist noch die Kategorie der betrachteten Ursachen ein Unterscheidungsmerkmal. So können Risiken generell durch Fehler im System, Betrieb des Systems außerhalb der Funktionsgrenzen, funktionale Unzulänglichkeiten sowie durch Manipulation entstehen. Eine Übersicht über die erwähnten Kategorien sowie die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Auswahlen sind im morphologischen Kasten in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Morphologischer Kasten zur möglichen Einteilung von Bewertungsmethoden mit hervorgehobenen, behandelten Auswahlen

Aspekt	Ausprägung			
Bewertungskriterien	Risiko	Nutzen	Machbarkeit	
Bewertungszeitpunkt	prospektiv	in Echtzeit	retrospektiv	
Bewertungsgrundlage	statistische Daten	Expertenmeinung	Modelle	Versuche
Bewertungsgenauigkeit	qualitativ	semiquantitativ	quantitativ	
Vorgehen	induktiv	deduktiv		
Bewertungsgegenstand	Luftfahrt	HAV	Transportmittel	Anlagen
Ursachenkategorie (beschränkt auf Risiko)	Fehler	Funktionsgrenzen	Funktionale Unzulänglichkeiten	Manipulation

2.1.2 Risikobewertungsmethoden

Die Gefährdungsanalyse und Risikobewertung ist ein elementarer Bestandteil der Sicherheitstechnik und dementsprechend gibt es dafür eine Vielzahl von Techniken und Methoden. Grundsätzlich müssen bei der Risikobewertung die drei Fragen „Was kann passieren?“, „Wie wahrscheinlich ist das?“, und „Wie groß sind die Konsequenzen?“ beantwortet werden [17, S. 13]. Einen ausführlichen Überblick über die relevantesten Aspekte liefert Ericson [16]: Um Risiken bewerten zu können, muss die zugrundeliegende Gefährdung ausreichend beschrieben sein. Dafür führt er eine Gefährdungstheorie („hazard theory“) ein, in der Gefährdungen aus einer Gefährdungsquelle (GQ), mehrerer initiierender Mechanismen (IM) sowie einer resultierenden Schadensschwere eines betroffenen Ziels aufgrund der Gefahr (SZG) bestehen. Für den Eintritt eines Schadens müssen dann alle Mechanismen der Gefährdung in der richtigen Abfolge auftreten (Abb. 2.1) [16].

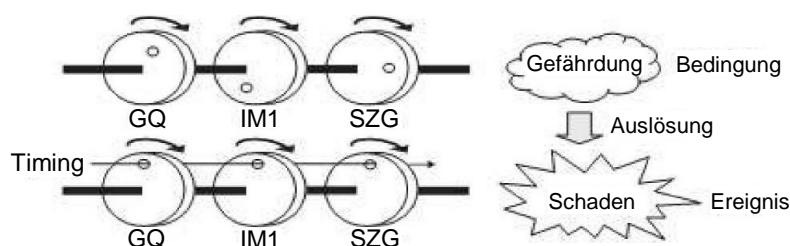


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Gefährdungstheorie nach Ericson [16, S. 36]

Zur Identifikation, Analyse und Bewertung von Gefährdungen gibt es nach Ericson sieben verschiedene Typen und mehr als 100 Techniken. Die Typen definieren in welcher Phase der Produktentwicklung und mit welcher Detaillierung die Analyse durchgeführt wird. Die Techniken beschreiben die unterschiedlichen Methoden und Beschreibungsmittel. Die meisten der Techniken sind lediglich kleinere Variationen von verbreiteten Techniken [16].

Ein wichtiger Aspekt ist die Unterscheidung von quantitativen und qualitativen Analysen. Qualitative Analysen sind grundsätzlich mit deutlich geringerem Aufwand durchführbar, können aber dennoch bereits brauchbare und valide Ergebnisse liefern. Deshalb ist es üblich, zunächst mit qualitativen Methoden Risiken abzuschätzen und lediglich für Gefährdungen mit hohem Risiko eine quantitative Analyse durchzuführen [16, S. 67].

Zu Beginn steht die Identifikation von möglichen Gefährdungen. Dafür kann entweder die direkt darauf spezialisierte Preliminary Hazard List Analysis (PHL) durchgeführt werden oder bereits bewertende Verfahren, wie beispielsweise die Preliminary Hazard Analysis (PHA) oder die Hazard and Operability Analysis (HAZOP) genutzt werden.

Ein neues Verfahren zur Gefährdungsanalyse ist die von Stringfellow, Leveson und Owens [18] entwickelte System-Theoretic Process Analysis (STPA). Diese basiert auf dem Fehlermodell Systems-Theoretic Accident Model and Processes (STAMP) [19, 20], das besagt, dass Fehler aufgrund von ungenügenden Kontrollaktionen entstehen. Bei STPA werden die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen Ereignissen und den Systemkomponenten berücksichtigt, indem das Gesamtsystem auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen als Regelungsstruktur modelliert wird. Dadurch können potenzielle Ursachen von Unfällen identifiziert werden. Zudem erleichtert die enge Kopplung an eine modellierte Systemarchitektur die Berücksichtigung von Systemänderungen während der Entwicklung.

Für die Bewertung der Risiken dieser Gefährdungen wird bei qualitativen Verfahren wie PHA, HAZOP, Functional Hazard Analysis (FHA) und System Hazard Analysis (SHA) grundsätzlich die Häufigkeit und Schadensschwere durch Kategorien abgeschätzt. Für die Einstufung werden die Kategorien des ursprünglich 1969 erstellten Militärstandards MIL-STD-882 [21] verwendet, die in Tabelle 2.2 dargestellt sind.

Tabelle 2.2: Qualitative Kategorien für Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere [21]

Schadensschwere Kategorie	Beschreibung	Wahrscheinlichkeitslevel	Beschreibung
1	Katastrophal	A	Häufig
2	Kritisch	B	Wahrscheinlich
3	Marginal	C	Gelegentlich
4	Unbedeutend	D	Selten
		E	Unwahrscheinlich
		F	Beseitigt

Werden diesen qualitativen Kriterien quantitative Wertebereiche zugeordnet, spricht man von semi-quantitativen Methoden [14, S. 35]. Dieser semi-quantitative Bewertungsansatz wird auch in der G&R der ISO 26262 [13] verwendet, wobei noch zusätzlich die Kategorie der Kontrollierbarkeit hinzugefügt wurde. Sind darüber hinaus quantitative Analysen notwendig, so stehen die Techniken Fehlerbaumanalyse (FTA), Ereignisbaumanalysen (ETA), Cause-Consequences-Analysis (CCA), Markov Analysen (MA) und Petrinetz Analysen (PNA) zur Bestimmung von Zustands- und Fehlerhäufigkeiten zur Verfügung [16].

2.1.3 Begriffsdefinitionen

Risiko

Nach Bechmann [22] kann man „drei grundlegende Orientierungen und Betrachtungsweisen klassifizieren: einen formal-normativen Ansatz, einen psychologisch-kognitiven Ansatz und einen kulturell-soziologischen Ansatz“ [22, IX]. Während der Erste versucht, das Risiko möglichst objektiv zu quantifizieren, wird beim Zweiten das subjektiv empfundene Risiko untersucht. Wobei Bechmann berechtigterweise anführt, dass auch beim formal-normativen Ansatz aufgrund fehlender Daten häufig nur eine subjektive Bewertung durch Experten möglich ist. Dagegen betrachtet der kulturell-soziologische Ansatz die Entstehung von Meinungsbildern in der Gesellschaft zu bestimmten Risiken.

In dieser Arbeit wird nur der formal-normative Ansatz verfolgt und dementsprechend, wie in technischen Domänen und Normen üblich, Risiko als Kombination von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schwere eines Schadens definiert [22, IX] [7, S. 147] [23, S. 16] [24, S. 37] [12, S. 19] [16, S. 33]. Nach der Definition von Peters und Peters [24, S. 37] kann ein Risiko qualitativ, quantitativ oder auch kombiniert angegeben werden. Darüber hinaus kann noch zwischen dem kollektiven und dem individuellen Risiko unterschieden werden, die sich durch die Wahl der Bezugsgröße unterscheiden. Das kollektive Risiko beschreibt alle Schäden durch das System innerhalb eines Zeitraums und wird in Bezug zu Leistungswerten wie Personenkilometern angegeben. Das individuelle Risiko bezieht sich dagegen auf die persönlichen Nutzungszeit oder Frequenz [25, S. 10]. Die hier vorliegende Risikoabschätzung dient zur Abschätzung des Erwartungswerts des kollektiven Risikos.

Sicherheit

Sicherheit bezeichnet einen Zustand, in dem das Risiko unter einem akzeptierten Grenzwert liegt [26, S. 91] [12, S. 20] [7, S. 175]. Es gibt mehrere Prinzipien, das akzeptierte Risiko einer technischen Entwicklung abzuschätzen. Die wichtigsten davon sind *Minimum Endogenous Mortality* (MEM), *As Low As Reasonable Practicable* (ALARP) und *Globalement Au Moins Aussi Bon* (GAMAB, mindestens gleiche Sicherheit) [7, S. 175]. Allerdings wird diese Einstufung des Risikos in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Vielmehr soll durch eine Bewertung der möglichen Risiken die Anwendung dieser Prinzipien ermöglicht werden.

Gefährdung

Als Gefährdung wird ein Fehler, eine Bedingung oder Situation bezeichnet, die einen Schaden verursachen kann [24, S. 37] [12, S. 15]. Eine Gefahr liegt in Situationen vor, in denen Personen einer Gefährdung ausgesetzt sind [12, S. 15].

Verhalten

In der ISO 26262 wird der Begriff Verhalten (behaviour) sowohl bei der Definition der intendierten Funktionalität eines Systems als das spezifizierte Verhalten [12, S. 16] als auch bei der Definition von Fehlverhalten (malfunctioning behaviour) als unintendiertes Verhalten [12, S. 10] verwendet. In Anlehnung daran wird in dieser Arbeit der Begriff Verhalten für die auf Fahrzeugebene, also von außen sichtbaren Aktionen des automatisierten Fahrzeugs verwendet. Damit beinhaltet das Verhalten die Auswirkungen des intendierten Verhaltens und von Fehlern.

Szenarien

Es gibt in der Literatur zahlreiche Definitionen für den Begriff Szenario, die zwar größtenteils ähnlich, aber nicht deckungsgleich sind. Grundsätzlich wird unter einem Szenario die

Beschreibung einer Abfolge von Ereignissen oder Aktionen verstanden. Beispielsweise ist in der ISO 24765 ein Szenario als „1. a step-by-step description of a series of events that may occur concurrently or sequentially. [...] 2. an account or synopsis of a projected course of events or actions. [...] 3. a description of a specific sequence of actions“ [27, S. 323] definiert.

Da diese Definition allgemein gehalten ist, finden Szenarien auch in den unterschiedlichsten Domänen Verwendung. Im Bereich der Fahrerassistenzsysteme gibt es zahlreiche Werke, die diese Definition präzisieren. Um für ein einheitliches Verständnis zu sorgen, präsentieren Ulbrich et al. [28] einen Überblick über die vorhandenen Definitionen und leiten daraus einen Vorschlag für eine präzise Szenariendefinition ab: „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“ [28, S. 114].

Neben der Definition des Szenariobegriffs versuchen die Autoren auch eine klare Abgrenzung zu den Begriffen Szene und Situation zu erreichen, die bei automatisierten Fahrfunktionen als Schnittstellenbezeichnungen in der Verhaltensgenerierung sinnvoll sind. Die in der Definition verwendete Szene ist demnach die Beschreibung einer Momentaufnahme von dynamischen Objekten, der Szenerie (räumlich stationäre Elemente) und die Selbstrepräsentation aller Akteure [28]. Eine „Situation beschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind“ [28, S. 110] und ist damit eine subjektive Interpretation der Szene.

Abstraktion, Konkretisierung und Spezialisierung

Ein entscheidender Bestandteil der entwickelten Methodik ist der Umgang mit unterschiedlichen Abstraktionsleveln. Dabei werden abstraktere Beschreibungen (hoher Abstraktionslevel) als allgemeingültiger und weniger detailliert verstanden. Die Abstraktionsebene von Beschreibungen kann in zwei unterschiedlichen Dimensionen reduziert werden. Unter einer Spezialisierung wird die Detaillierung und damit Einschränkung eines Szenarienbereichs verstanden. Beispielsweise ist ein Überholmanöver in einer Linkskurve bei Regen spezieller als Überholmanöver allgemein. Die Detaillierung der zweiten Dimension wird als Konkretisierung bezeichnet. Diese beschreibt den Detailgrad der verwendeten Verhaltens- und Risikomodelle und ermöglicht so eine hierarchische Strukturierung der Modelle. Beispielsweise ist eine statistische Simulation des Risikos eines Auffahrunfalls konkreter als dessen qualitative Abschätzung.

2.2 Methoden zur Risikobewertung von Fahrfunktionen

Neben den bisher aufgeführten Grundlagenwerken zur Risikobewertung werden im folgenden Abschnitt die relevanten Veröffentlichungen zur Risikobewertung von HAV analysiert.

2.2.1 Risikobewertung nach ISO 26262

Die Norm ISO 26262 [12] behandelt die funktionale Sicherheit von elektronischen/elektrischen Systemen in Serien-Pkw bis 3,5 Tonnen. Die 2011 veröffentlichte Norm wurde von der generell

für alle Industrien geltenden IEC 61508 abgeleitet [29, S. 1] und 2018 in der zweiten Version aktualisiert [30]. Da auch HAV innerhalb des Anwendungsbereichs der ISO 26262 liegen, sind die dort beschriebenen Aspekte bezüglich der Risikobewertung relevant. Dabei ist zu beachten, dass die Norm auf Risiken durch Fehlfunktionen beschränkt ist [12, S. 1]. Wie in Abschnitt 1.2 für Anforderung 4 abgeleitet, soll die hier entwickelte Technik explizit auch weitere Risiken berücksichtigen.

Die wichtigsten Anforderungen der ISO 26262 [13, S. 13-17] an die G&R sind: Die G&R soll auf der Systembeschreibung („Item definition“) ohne Berücksichtigung von integrierten Sicherheitsmechanismen basieren. Im ersten Schritt sollen Betriebssituationen identifiziert und beschrieben werden, in denen Systemfehler zu gefährlichen Ereignissen führen können. Anschließend müssen mögliche Gefährdungen durch Fehlfunktionen des Systems mit Hilfe von etablierten Methoden identifiziert werden. Durch Auswahl der relevanten Kombinationen aus Betriebssituationen und Fehlfunktionen inkl. deren Konsequenz ergeben sich die relevanten gefährlichen Ereignisse („hazardous events“). Die Klassifikation bzw. Bewertung dieser Ereignisse erfolgt über ein semi-quantitatives Verfahren mit den drei, diskreten Kategorien Schadensschwere („Severity“) S0-S3, Expositionswahrscheinlichkeit („Exposure“) E0-E4 sowie Kontrollierbarkeit („Controllability“) C0-C3. Die diskreten Stufen beschreiben dabei jeweils eine Größenordnung, womit die Summation der drei Kategorien zu den „Automotive Safety Integrity Level“ (ASIL) dem Logarithmus der Multiplikation entspricht. Detailliertere Ausführungen zur G&R der ISO 26262 sind beispielsweise in [31, 32] zu finden.

2.2.2 Prospektive Effektivitätsbewertung von FAS

Bei der Entwicklung von Sicherheits- und Precrashsystemen wurden in den letzten Jahren Verfahren entwickelt, um die Effektivität solcher Systeme bereits während der Entwicklung abzuschätzen und dadurch möglichst optimale Systemauslegungen erreichen zu können. Die ursprünglich von Busch [33] entwickelte Methodik wurde in mehreren Aspekten weiterentwickelt. Hannawald [34] ergänzte die Bewertung um Wechselwirkungen zwischen mehreren Systemen, Gschwendtner [15] erweiterte sie um den Sachschadenbereich und Ovcharova [10] detaillierte den menschlichen Einfluss des Fahrers. Das Prinzip ist dabei immer, dass für real aufgetretene Unfälle mögliche positive Effekte eines virtuellen Funktionsprototypen durch Simulation ermittelt werden und dadurch die Effektivität der Funktion abgeschätzt wird.

Soll diese Methodik nun auf die Bewertung von automatisierten Fahrfunktionen übertragen werden, ergeben sich zwei gravierende Änderungen. Einerseits hat eine HAV-Funktion kein eng umgrenztes Wirkungsfeld bezogen auf wenige Unfalltypen, sondern übernimmt die komplette Fahraufgabe innerhalb der definierten Domäne. Dadurch müssen neben den potenziellen Unfallszenarien auch sämtliche anderen möglichen Szenarien berücksichtigt werden. Andererseits sind für die einzelnen Fälle nicht wie bei Unfällen der tatsächlich stattgefundenen Ablauf und Ausgang teilweise bekannt, sondern sind auch neue Unfallursachen und Abläufe durch die Automation möglich. Winner [35] erwartet durch die Automation der Fahraufgabe zwar eine Reduktion von bisherigen kritischen Situationen, aber aufgrund der geänderten Grundprinzipien des Fahrens auch neue Automationsrisiken. Helmer et al. [36] diskutieren die Unterschiede in der Bewertung zwischen Sicherheitssystemen und kontinuierlich eingreifenden Systemen und schlagen als Bewertungswerkzeug eine umfassende Simulation vor, ohne allerdings näher darauf einzugehen.

2.2.3 Bewertungsmethoden für automatisierte Fahrfunktionen

Im Folgenden werden relevante Veröffentlichungen den Aspekten der Bewertungsmethodik zugeordnet und analysiert.

Gefährdungsanalyse

Bagschik et al. [37] führen an, dass die klassischen Gefahrenanalysen an der Vielfalt der für HAV relevanten Fahrsituationen scheitern. Deshalb wird eine modifizierte HAZOP Methodik vorgestellt, um auf Basis eines Fähigkeitengraphen mögliche Systemfehler zu identifizieren. Die möglichen Szenen setzen sich aus allen Kombinationen von wenigen, diskreten Parametern zusammen. Anschließend werden alle möglichen Kombinationen von Fehlfunktionen, Szenen und Betriebsmodi in einer Datenbank abgelegt. Um von dieser vollständigen Betrachtung auf ein handhabbares Maß von gefährlichen Ereignissen zu kommen, werden automatische Filter auf die Datenbank angewendet [37].

Aufgrund der guten Abbildbarkeit von HAV durch Regelkreise wird STPA immer häufiger auch für die Bewertung von HAV verwendet. Mallya et al. [38] untersuchen die Konformität von STPA mit der Methodik und den Anforderungen der ISO 26262. Da die Norm bei der Gefährdungsanalyse keine konkreten Vorgaben zu den verwendeten Verfahren macht und STPA keine Risikobewertung beinhaltet, kann STPA problemlos für den ISO 26262 Prozess verwendet werden. Bagschik et al. [39] wenden ebenfalls die STPA auf das autonome Absicherungsfahrzeug an, allerdings identifizieren Sie dabei Probleme bei der regelungstechnischen Darstellung der komplexen Umgebungsinteraktion. Abdulkhaleq et al. [40] nutzen die STPA im Rahmen der ISO 26262 und zusätzlich zur Identifikation von gefährlichen Szenarien, auch über den Betrachtungsumfang der ISO 26262 hinaus.

Formalisierung der Bewertung

Kemmann und Trapp [41] entwickelten den systematischen G&R Ansatz "Systematic Approach for Hazard Analysis and Risk Assessment" (SAHARA). Neben der Integration in den ISO 26262 Prozess dient ihre Formalisierung einer vergleichbareren und konsistenteren Risikobewertung. Darüber hinaus berücksichtigen sie Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Systemen durch eine modellbasierte Beschreibung auf Basis von Funktionen, wie bei Functional Hazard Analysis üblich [41]. Für ihre Situationsformalisierung durch Listen von Einflussfaktoren, die in einer Ontologie verwaltet werden, präsentieren sie auch eine Exposure-Bewertungshilfe auf Basis von ähnlichen Situationen. Die Kontrollierbarkeitsbewertung wird durch eine semiquantitative Modellierung von Reaktionen und Reaktionszeiten und deren Monte Carlo (MC) Simulation formalisiert. [41]

Ständer [42] nutzt stochastische Petrinetze, um die von der ISO 26262 geforderte G&R zu objektivieren. Er beschränkt sich dabei auf die Modellierung des „aktuellen Fahrzeug(bewegungs)-Zustand[s] und de[r] vorherrschenden Umgebungsbedingungen“ [42, S. 131] und damit nur auf die Modellierung der Expositionswahrscheinlichkeit. Die Schadensschwere und Kontrollierbarkeit werden aufgrund der größeren Komplexität nicht näher betrachtet. Der Umgebungszustand und der Fahrzeugzustand werden jeweils aus der Kombinatorik von diskreten Merkmalen gebildet, wodurch sich selbst bei den verwendeten, reduzierten Beispielen schon umfangreiche Petrinetze ergeben.

Roesener identifiziert ebenfalls die Herausforderung des neuen „situation space“ bei HAV. Zur Bewertung der HAV Leistungsfähigkeit präsentiert er einen Ansatz basierend auf einer automatisierten Situationserkennung, um die Leistungsfähigkeit von HAV mit denen von Fahrern vergleichen zu können. [43]

Mader [44] präsentiert eine Erweiterung der Domain specific Language EAST-ADL, um Preliminary Hazard Analysis zu unterstützen. Durch einen automatischen Property Checker und Model Corrector kann die Anwendung der Methode unterstützt und die Qualität der Ergebnisse verbessert werden.

Automatisierte Verknüpfung mit der Systemdefinition

Ein Ansatz, um die Sicherheitsanalyse für sich ändernde Systeme effizienter zu gestalten, wird von Papadopoulos [45] präsentiert. Sein Anwendungsfall, durch automatisierte Generierung von Fehlerbäumen auf Basis von Simulinkmodellen [45] die Sicherheitsarchitektur zu optimieren [46], ist zwar auf einer anderen Abstraktionsebene, dennoch ist die Grundidee, die Sicherheitsanalyse durch Teilautomatisierung in den Entwicklungsprozess zu integrieren, ähnlich.

Automatisierte Simulation

Eine weitere Möglichkeit, automatisierte Fahrfunktionen zu bewerten, sind komplexe und realitätsnahe Simulationen. Diese werden primär dafür eingesetzt, die automatisierten Fahrfunktionen weiterzuentwickeln und beispielsweise in der Realität aufgetretene Probleme in der virtuellen Welt nachzubilden und dadurch die Algorithmen entsprechend zu verbessern [47]. Solche Simulationen können bei entsprechender Realitätsnähe auch dazu eingesetzt werden, um in der virtuellen Welt potenzielle Risiken zu identifizieren [48]. Dieses Vorgehen setzt allerdings bereits eine funktionierende algorithmische Umsetzung der Fahrfunktion voraus und ist deshalb in der frühen Entwicklungsphase nicht geeignet.

2.2.4 Echtzeitriskoschätzung

Neben der Risikobewertung während des Entwicklungsprozesses gibt es auch relevante Methoden im Bereich der Echtzeitriskoschätzung, wie sie beispielsweise für Pre-Crash-Systeme benötigt wird. Ein einfacher Ansatz findet sich in Rodemerk [49]. Er entwickelt ein allgemeingültiges Kritikalitätskriterium zur Bewertung von Fahrsituationen. Ausgehend von der Risikodefinition als Kombination aus Schadenswahrscheinlichkeit mit Schadensschwere, bildet er für die aktuelle Situation und deren prädizierten Entwicklung einen Risikowert durch Auswertung der Positionsüberlappungen. Eggert [50] nutzt ebenfalls klassische Prädiktionsmodelle zur Abbildung der Schadenswahrscheinlichkeit und Zustandswahrscheinlichkeit, berücksichtigt aber noch zusätzlich eine Ereigniswahrscheinlichkeit. Für die Modellierung der Wahrscheinlichkeiten der seltenen, kritischen Ereignisse verwendet er Poissonprozesse. Diese können für beliebige kritische Ereignisse überlagert werden [50]. Die dabei berücksichtigten Unsicherheiten bei der online Risikoschätzung unterscheiden sich deutlich von der in dieser Arbeit entwickelten, prospektiven Bewertung.

Für die Modellierung von Verkehrssituationen nutzt Schamm [51, 52] eine objektorientierte, probabilistische, relationale Beschreibungssprache. In Kombination mit aktuellen Messungen der Umgebung wird das Modell zur Schätzung der vorliegenden Verkehrssituation genutzt. Aufgrund des modularen Ansatzes können auch Risikomaße einer Situation modelliert werden, wie in [51] beispielhaft mit der TTC gezeigt. Die Modellierung besteht dabei aus hierarchisch geordneten Klassen, die jeweils probabilistische und nicht probabilistische Attribute sowie relationale Attribute besitzen können. Durch Hinzufügen von Verteilungsfunktionen der diskreten, probabilistischen Attribute kann automatisiert ein Bayessches Netz abgeleitet werden. Damit wird mit aktuellen Messwerten durch Inferenz die aktuelle Situationswahrscheinlichkeit abgeschätzt [52].

Gleirscher und Kugele [53, 54] präsentieren eine formale Beschreibung, um das reale Verkehrsgeschehen durch drei Abstraktionen zuerst in einem Zustandsraum, dann in einem Aussagenraum und abschließend in einem Risikozustandsraum abzubilden (Abb. 2.2). Gefährdungen können formal mit den Zuständen „inaktiv“, „von einer Aktion aktiviert“, „zu einem Unfall beitragend“ und „durch eine Aktion abgemildert“ [53, S. 314] dargestellt werden. Durch Definition einer Vermeidungshierarchie kann per Algorithmus eine Risikostruktur aufgebaut werden, die alle gefährdenden Zustände sowie deren Kombinationen und Zustandsübergänge beinhaltet (Abb. 2.3). Durch Hinzufügen von Gewichten zu den einzelnen Modellbestandteilen können abschließend Übergangswahrscheinlichkeit und auch Schadensschweren mit abgebildet werden [53].

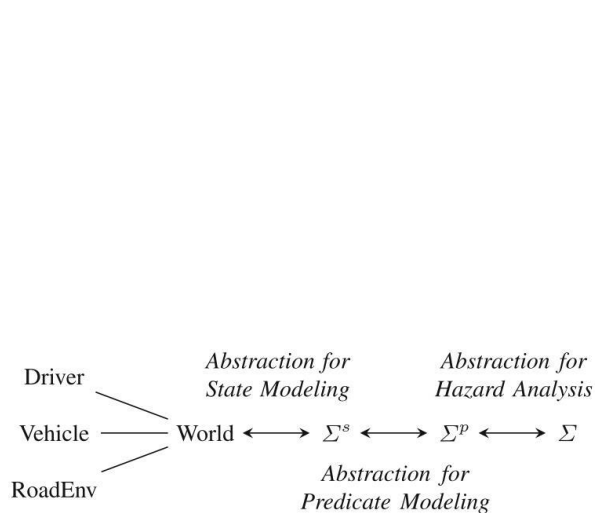


Abb. 2.2: Abstraktionsebenen zur Überführung des Verkehrsgeschehens in einen Zustandsraum, einen Aussagenraum und einen Risikozustandsraum [53, S. 313]

Adler et al. [55] nutzen das klassische Vorgehen aus der ISO 26262, um systematisch einen Überwacher für HAV abzuleiten. Interessant ist dabei einerseits die formale Beschreibung von Situationen auf Basis einer abstrakten Liste. Andererseits schätzen sie durch einfache Berechnungen die Parametergrenzen ab, um gefährliche Ereignisse an den ASIL-Stufen zu trennen. Dadurch lassen sich entsprechende Anforderungen an den Überwacher ableiten.

2.3 Methoden der Risikobewertung in anderen Domänen

Die Risikobewertung von Fahrfunktionen ist noch ein junges Forschungsfeld. Ursprünglich kommen die meisten der in Abschnitt 2.1.2 aufgeführten Techniken aus der Nuklear-, der Anlagentechnik sowie der Luft- und Raumfahrttechnik. Die etablierten Techniken dieser Domänen wurden über die daraus resultierenden Normen entsprechend übertragen. Gerade im Bereich des Schienenverkehrs und der Robotik gibt es ähnliche Problemstellungen, weshalb abschließend auch noch relevanten Methoden aus diesen Domänen aufgeführt werden.

In der Robotik ist ein zur ISO 26262 ähnliches semiquantitatives Verfahren zur Risikoabschätzung genormt [56]. Allerdings werden die Kriterien Schadensschwere, Frequenz

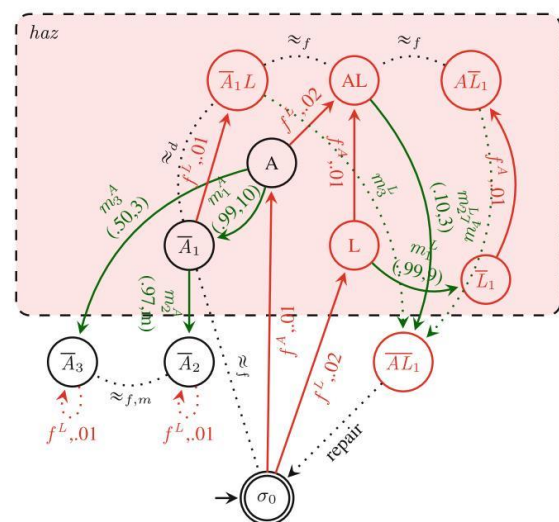


Abb. 2.3: exemplarische Risikostruktur mit den gefährlichen Fehlerzuständen A und L sowie deren Vermeidungszuständen durch Fehler- (f) und Vermeidungsaktionen (m) [53, S. 323]

und Vermeidungsmöglichkeit nur in jeweils zwei diskreten Stufen unterschieden. Ein Anwendungsbeispiel für einen kollaborativen Roboter findet sich in [57].

Guiochet et al. [58] beschäftigen sich mit der Gefährdungsanalyse einer automatisierten Gehhilfe. Im ersten Schritt wird die Domäne und deren möglichen Gefahren noch ohne den Roboter analysiert. Sobald die Aufgaben des Roboters in UML spezifiziert sind, wird zur Gefährdungsidentifizierung eine PHA und eine auf UML adaptierte HAZOP durchgeführt. Durch Nutzung der beiden komplementären Methoden können Gefährdungen umfassender identifiziert werden. Die Risikobewertung wird hier allerdings aufgrund unbekannter Häufigkeiten auf eine Abschätzung der möglichen Schäden reduziert [58].

Der Herausforderung, dass mobile Roboter Gefahren ausgesetzt sind, die nicht direkt mit ihrer Mission zusammenhängen, begegnen Dogramadzi et al. [59] mit einer Erweiterung der PHA zur „Environmental Survey Hazard Analysis (ESHA)“ [59, S. 17]. Um zu verhindern, dass die nicht missionsbezogenen Gefahren bei der Analyse übersehen werden, nutzen Sie eine ausführliche Checkliste in Kombination mit erweiterten Schlüsselwörtern.

Ein umfassender Ansatz zur modellbasierten Risikobewertung von Verkehrssystemen stammt von Slovak [25]. Das PROFUND-Modellkonzept berücksichtigt den (Verkehrs-)Prozess (PRO), die zu entwickelnde Funktion (FUN) der Prozesssteuerung sowie die Verlässlichkeit (Dependability D) [25]. Dabei wird ein „modulares Systemmodell, in dem alle einzelnen Aspekte separat und sukzessiv sowie in fortschreitender Verfeinerung beschrieben werden können“ [7, S. 346] auf Basis von stochastischen Petrinetzen verwendet. Zuerst wird der ideale Verkehrsprozess modelliert, der anschließend mit Störungen und Ausfällen überlagert wird. Die Prozesssteuerung wird ideal modelliert und die Zuverlässigkeit dieser Funktionen durch eigene Verlässlichkeitsmodelle der benötigten Komponenten abgebildet [25]. Dementsprechend wird die Funktionalität des zu entwickelnden Systems explizit in das Risikomodell integriert. Allerdings werden strikte Annahmen getroffen, um die Modellierbarkeit durch Petrinetze zu ermöglichen. So muss gegeben sein, dass „die Funktionalität des gesamten Systems in Einzelfunktionen zerlegbar ist, wobei jede Einzelfunktion des Systems als Reaktion auf eine Auslösung (Eingang) unter Erfüllung bestimmter funktionaler Bedingungen angesehen werden kann“ [7, S. 356]. Darüber hinaus benötigt die Darstellung mittels Petrinetzen eine Beschränkung auf diskrete Zustände. Mit diesen Einschränkungen scheint es schwer möglich, spezifische Risiken von HAV in einem generellen Verkehrsmodell für den Straßenverkehr abzubilden. Dennoch kann dieser Ansatz zur Modellierung einzelner Risiken hilfreich sein.

2.4 Kritik und Themenstellung

Im Folgenden wird aufgrund der Kritik am Stand der Wissenschaft die Notwendigkeit für die Entwicklung einer neuen Technik abgeleitet und die detaillierten wissenschaftlichen Fragestellungen formuliert.

2.4.1 Kritik am Stand der Wissenschaft

Zu einigen der in Kapitel 1.2 abgeleiteten Anforderungen wurden im Stand der Wissenschaft keine adäquaten Lösungen identifiziert. Die zwei Kernherausforderungen von HAV bezüglich der Risikobewertung sind die Szenarienvielfalt und das komplexe Funktionsverhalten. Die

Szenarienvielfalt bringt in diesem Kontext drei wichtige Aspekte mit sich. Erstens die Identifikation der unzähligen Szenarien und Risiken, zweitens die Bewertung dieser Vielfalt und drittens den Umgang mit den umfangreichen Ergebnissen.

Zum Ersten gibt es die traditionellen Techniken zur Gefährdungsanalyse, die grundsätzlich anwendbar sind. Allerdings sind diese aufgrund der Vielfalt der zu berücksichtigenden Szenarien nur bedingt für HAV geeignet, wie beispielsweise auch Bagschik feststellt [37, S. 691]. Deshalb werden dazu neuartige Ansätze untersucht, die Identifikation durch Automation oder zufällige Simulation umzusetzen [37, 48]. Damit gibt es zur Gefährdungsanalyse eine Vielzahl sowohl von etablierten als auch von neuartigen Techniken, die für HAV angewendet werden können. Um eine möglichst umfassende Analyse zu erhalten, sollten diese möglichst gewinnbringend kombiniert werden.

Dies führt zum zweiten Aspekt der Bewertung der Vielfalt. Der Aufwand einer Risikobewertung hängt in erster Linie von der Genauigkeit sowie der benötigten Belastbarkeit der Bewertung ab. Erste qualitative Einschätzungen auf Basis von Expertenwissen sind auch für einen größeren Bewertungsumfang noch denkbar (A1), detailliertere Analysen sind aber nicht mehr vollumfänglich leistbar. Dementsprechend müssen die Bewertungen möglichst große Szenarienbereiche abdecken und je nach Kritikalität detailliert werden können (A2). In den klassischen Ansätzen wird das einfach durch Aneinanderreihung von unterschiedlich detaillierten Analysen erreicht. Bei PROFUND [25] ist es explizit durch sukzessive Detaillierung des Modells möglich. Allerdings ist damit nicht die Verwaltung von unterschiedlich abstrakten Bewertungen möglich.

Die Verwaltung der generierten Bewertungsergebnisse ist aufgrund der Vielfalt eine große Herausforderung. Um eine möglichst umfassende und vollständige Bewertung erreichen zu können, müssen die Bewertungen laufend und vor allem auch von unterschiedlichsten Benutzern ergänzt, angepasst und verwendet werden können (A6, A9). Bisher werden vor allem Techniken, die aus der benötigten Nachverfolgbarkeit von Anforderungen bekannt sind, auch mit Risikobewertungen verknüpft. Damit bei der Vielzahl der erwarteten Szenarien und Bewertungen der Überblick behalten werden kann und damit eine gezielte Detaillierung ermöglicht wird, benötigt man neue Verfahren.

Darüber hinaus ist für eine effiziente Entwicklung notwendig, dass die Auswirkungen von Funktionsänderungen auf das Risiko möglichst effizient bewertet werden können (A3). Der aktuelle Standard und die meisten Ansätze zur Bewertung basieren aber auf einer festen Systembeschreibung oder Item-Definition und müssen bei Änderungen komplett überprüft werden. Aufgrund der Komplexität einer HAV-Funktion wird sich deren genaue Definition während der Entwicklung mehrfach ändern, auch aufgrund von Risikobewertungen. Deshalb ist eine Zuordnung zwischen Aspekten der Systemauslegung und den Bewertungen notwendig. Einen ersten Schritt in diese Richtung geht die systemtheoretische Bewertung im Rahmen von STAMP [19, 20], weil dabei zumindest eine Verknüpfung von Kontrollflüssen und Gefährdungen nachvollziehbar ist. Bei der Verwendung von FHA oder SAHARA [41] wird auch ein Zusammenhang zwischen Funktion und Gefährdungen abgebildet, allerdings nur aus Gründen der Nachverfolgbarkeit und nicht zur direkten Modellierung von Abhängigkeiten. Den wichtigsten Beitrag liefert hier die PROFUND-Methode [25], bei der das System direkt einen Teil des Risikomodells darstellt. Allerdings ist dieser Ansatz aufgrund seiner starken Einschränkungen bezüglich der Modellierung nicht geeignet, das komplexe Zusammenspiel von HAV und Umwelt detailliert genug abzubilden. Dennoch kann die Technik zur Modellierung von Einzelrisiken verwendet werden. Der Ansatz von Gleirscher und Kugele [53, 54] ermöglicht durch die formale Beschreibung und automatischen Risikostrukturaufbau eine Unterstützung

bei geänderten Modellangaben, allerdings beschränken sich die aktuellen Beispiele auf abstrakte Fehlerreaktionen und nicht auf das generelle Funktionsverhalten.

2.4.2 Wissenschaftliche Fragestellungen

Aus den identifizierten Lücken im Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Anforderungen in 1.2 werden folgende Fragestellungen abgeleitet, für die im Rahmen dieser Arbeit Lösungen erarbeitet werden sollen:

Forschungsfrage 1 aus Anforderung A6

Wie kann die erwartete Szenarienvielfalt in einer Risikobewertung beherrschbar integriert werden?

Forschungsfrage 2 aus den Anforderungen A1, A2 und A9:

Wie kann eine Risikobewertung analog zum Entwicklungsprozess schrittweise erweitert und detailliert werden?

Forschungsfrage 3 aus der Anforderung A3

Mit welcher Technik kann die Sicherheit von HAV in Abhängigkeit von einer variablen Funktionsdefinition abgeschätzt werden?

Die restlichen Anforderungen A4, A5, A7 und A8 stellen Randbedingungen für eine Risikobewertungsmethode dar und stehen deshalb nicht im Fokus der wissenschaftlichen Arbeit.

2.4.3 Wissenschaftlicher Beitrag

Die in dieser Arbeit entwickelte Technik zur Risikobewertung stellt eine Lösungsmöglichkeit zur Erfüllung der gestellten Anforderungen dar. In diesem Kontext wurden für die formulierten Forschungsfragen wissenschaftlich relevante Lösungen entwickelt.

Zu Forschungsfrage 1: Es wurde ein entsprechendes Konzept zur Szenarienbeschreibung und zum Szenarienvergleich entwickelt und die Anwendbarkeit gezeigt. Durch die damit ermöglichte Abstraktion und erweiterbare Beschreibung können sowohl abstrakte als auch detaillierte Szenarien durchgängig beschrieben und automatisiert behandelt werden.

Zu Forschungsfrage 2: Die entwickelte durchgängige Unterstützung von Abstraktionsmechanismen in allen Bereichen der Risikobewertung und die Dekomposition von Szenarien, Verhaltensspezifikation sowie Risikobewertung ermöglicht eine durchgängige Begleitung des Entwicklungsprozesses. Durch die Konkretisierung und Spezialisierung kann die Funktion und die Bewertung gezielt verbessert werden.

Zu Forschungsfrage 3: Die Modellierung der Funktionsdefinition und die automatisierte Integration in die Risikobewertung ermöglichen eine automatisierte Bewertung von Funktionsänderungen. Anhand von Beispielen wird veranschaulicht, wie kleinere Verhaltensanpassungen und das Hinzufügen von kompletten Verhaltensweisen ermöglicht wird.

3 Vorgehen und Aufbau der modellbasierten Risikobewertung

Zur Beantwortung der definierten Fragestellungen wird in dieser Arbeit eine Technik zur Risikobewertung entwickelt, die alle in Abschnitt 1.2 definierten Anforderungen erfüllen kann. Unter Technik wird dabei nach Schnieder [7, S. 317] die Kombination aus einer Methode und einem Beschreibungsmittel, unterstützt durch Werkzeuge, verstanden. Das Vorgehen und der generelle Aufbau der Technik ist in diesem Kapitel beschrieben. Die wichtigsten Ansätze der Methodik wurden während der Entwicklung bereits in [60] und [8] vorveröffentlicht.

3.1 Vorgehensweise zur Modellbildung

Für die automatische Berücksichtigung der aktuellen Funktionsdefinition in der Bewertung ist eine Modellierung notwendig. Deshalb wird die Vorgehensweise der methodischen Modellbildung von Schnieder [7, S. 205] zur Strukturierung der Technikentwicklung verwendet. Dabei wird parallel zu den Überlegungen der Modellbildung auch das Beschreibungsmittel der formalen Szenarienbeschreibung entwickelt. Die Bedeutungen der in Abb. 3.1 dargestellten Schritte der Modellbildung werden im Folgenden kurz anhand des entwickelten Modells beschrieben.

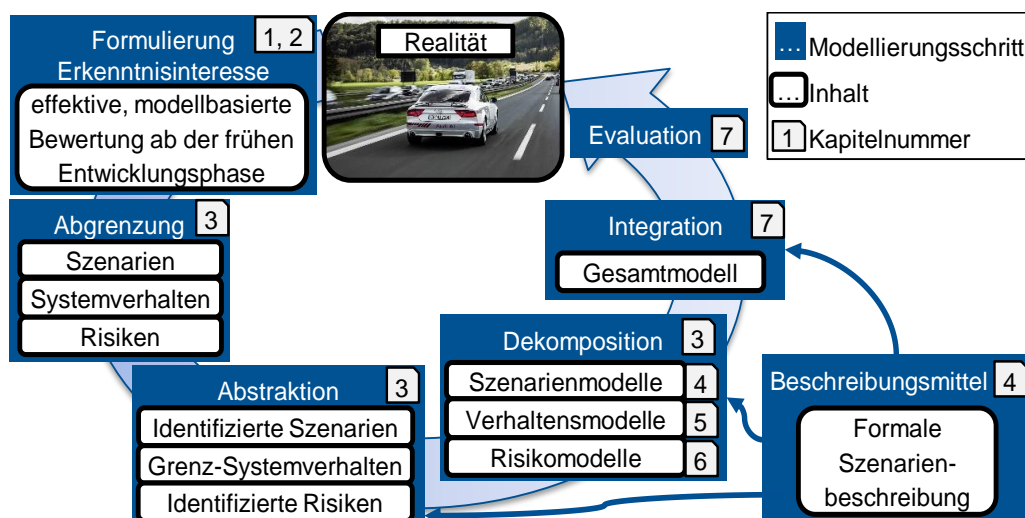


Abb. 3.1: Anwendung der Vorgehensweise zur methodischen Modellbildung nach Schnieder [7, S. 205] auf die vorliegende Problemstellung mit den jeweiligen Kapitelnummern der Arbeit

Formulierung Erkenntnisinteresse

Die Zielformulierung setzt sich aus den wissenschaftlichen Fragestellungen in Kap. 2.4.2 sowie den in Kap. 1.2 formulierten Anforderungen zur Präzisierung der gewünschten Resultate zusammen.

Abgrenzung

Da bei einer Modellierung unmöglich alle Aspekte der Realität abgebildet werden können, wird der Anwendungsbereich des Modells eingeschränkt. Die hier gezeigten Betrachtungen beziehen sich nur auf automatisiertes Fahren der Level 3, 4 und 5 ohne Berücksichtigung eines Fahrereingriffs. Die Interaktion von HAV und Fahrer wird hier vernachlässigt, weil die Betrachtung der Auswirkungen der reinen technischen Auslegung die große Neuerung bei HAV darstellt und deshalb fokussiert betrachtet wird. Nichtsdestotrotz soll auch die spätere Integration von Interaktionsrisiken in die Modellierung möglich sein. Eine weitere Abgrenzung betrifft den Funktionsumfang. Es wird aufgrund der aktuellen Relevanz eine Fahrfunktion für ein HAV betrachtet, das sich im Mischverkehr bewegt. D.h. die Funktion ist für die Erfüllung der Fahraufgabe eines Fahrzeugs zuständig und es handelt sich noch nicht um die simultane Steuerung von mehreren Fahrzeugen oder sogar Flotten.

Aus diesen Abgrenzungen und der Zielsetzung der Risikoabschätzung ergeben sich damit generell die für die Modellierung relevanten Aspekte Szenarien, Systemverhalten und Risiken.

Abstraktion

Nach Schnieder findet in diesem Schritt eine Komplexitätsreduktion durch Vernachlässigung von Aspekten statt. Diese können auch durch die Wahl des Beschreibungsmittels bedingt sein. Um die Einschränkungen in Bezug auf die Szenarienvielfalt und Risikomodellierung ausreichend gering zu halten, wird in dieser Arbeit einerseits ein eigenes Beschreibungsmittel zur Szenarienbeschreibung entwickelt und werden andererseits unterschiedliche Risikomodellierungen zugelassen. Ein wichtiger Aspekt der Abstraktion ist die Möglichkeit der iterativen Präzisierung der Modellierung. Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems und der geringen Felderfahrung bei der Einführung neuer Technologien können nicht alle relevanten Aspekte von Anfang an überblickt und berücksichtigt werden. Deshalb muss mit einer initialen Abschätzung anhand des aktuellen Wissensstands begonnen werden, die sich dann sukzessive detaillieren und verbessern lässt.

Eine große Herausforderung bei HAV sind die komplexen Wechselwirkungen zwischen der Funktionsausprägung und der sich dadurch ergebenden Verkehrsszenarien. Um die Gesamtmodellierung auf einem beherrschbaren Komplexitätsniveau zu halten, werden diese wechselseitigen Einflüsse aufgrund der vereinfachten Modellierung vernachlässigt und können demnach nicht automatisch identifiziert werden. Werden während der Entwicklung solche Wechselwirkungen anderweitig identifiziert, können diese durch explizite Berücksichtigung in speziellen Risikomodellen oder durch entsprechende Beeinflussung der Szenarienparameterverteilungen integriert werden.

Eine detaillierte Modellierung und Präzisierung aller für HAV benötigten Modelle ist nicht in diesem Rahmen leistbar. Deshalb wird in dieser Arbeit der Aufbau und die Validierung der Technik auf einige Beispielm Modelle beschränkt. Die Technik soll als Grundlage die Annäherung an eine ausreichend vollständige Bewertung unterstützen. Eine detaillierte und begründete Abstraktion der einzelnen Teilmodelle der Szenarien, Funktionsspezifikation und Risiken wird in den entsprechenden Kapiteln vorgenommen.

Dekomposition

Das Verhalten des HAV hängt von dem aktuellen Szenario ab. Aufgrund der Szenarienvielfalt ist eine manuelle Beschreibung des Verhaltens in jedem Szenario nicht zielführend. Die entstehenden Risiken hängen ebenfalls von den Szenarien und zusätzlich vom Verhalten ab. Eine feste Kopplung an Szenarien und Verhalten wäre entsprechend hinderlich, um die Szenarienvielfalt beherrschen zu können. Deshalb werden Szenarien, Verhalten und Risiken durch eigene Modellierungen abgebildet. Die entstehenden Risiken können anschließend aus der Kombination der drei Modellierungen abgeschätzt werden. Demnach wird das Gesamtmodell auf diese drei Einzelmodelle aufgeteilt, die in den entsprechenden Kapiteln 4, 5 und 6 detailliert beschrieben werden. Das dabei entwickelte Beschreibungsmittel der formalen Szenarienbeschreibungssprache dient auch dazu, die drei Modellbestandteile anschließend wieder zu verknüpfen.

Integration

Das Zusammenführen der Teilmodelle für Szenarien, Verhalten und Risiken basiert auf einer jeweiligen Verknüpfung mit dem formalen Szenarienraum. Dadurch kann für jedes beliebige Szenario abgeleitet werden, welche Verhaltensweisen und anschließend welche Risiken dafür relevant sind.

Evaluation

Aufgrund der fehlenden Datenlage bei einer prospektiven Risikobewertung ist eine abschließende datenbasierte Validierung nicht möglich. Nach Schnieder ist „sicherzustellen, dass das Modell das System genau genug und fehlerfrei widerspiegelt. Als Referenzen hierfür können z. B. eine Anforderungsspezifikation, etablierte oder standardisierte Modelle, jedoch auch Expertenwissen dienen“ [7, S. 206]. Deshalb wird bei der Evaluation der Risikobewertungstechnik die Erfüllung der definierten Anforderungen aus Abschnitt 1.2 anhand von Beispielbetrachtungen untersucht sowie Vergleiche mit den etablierten Methoden der Risikobewertung angestellt. Die Einzelmodelle werden jeweils in den Kapiteln 4 bis 6 und das Gesamtmodell in Kapitel 7 plausibilisiert und bewertet.

3.2 Technik der modellbasierten Bewertung

Die entwickelte Technik zur modellbasierten Bewertung von HAV basiert auf einer getrennten Modellierung von Szenarien, Funktionsspezifikation und Risiken, die durch einen formalen Szenarienraum kombiniert werden. Im Folgenden werden dieser Aufbau, der Szenarienraum und der Umgang mit unterschiedlichen Abstraktionsebenen der Modelle sowie die Bewertungsmethodik beschrieben.

3.2.1 Aufbau des Bewertungsmodells

Bei komplexen Problemstellungen bietet sich eine Separation zur Reduktion der Komplexität an. So beurteilt Schnieder [7] die Separation von PROFUND in einen Verkehrsprozess, dessen korrekte Steuerung sowie deren Zuverlässigkeit der Implementierung folgendermaßen. „Trotz der Separation der verschiedenen Teile, die scheinbar gegen den Anspruch der Ganzheitlichkeit verstößt, ist dieses Konzept gut geeignet, eine gewisse Vollständigkeit zu erzielen, Komplexität durch Modularisierung zu verringern und verschiedene Sichten zu integrieren“ [7, S. 354]. Dadurch motiviert wird für die hier entwickelte Technik eine Separation

in Szenarien, Funktionsspezifikation und Bewertung umgesetzt (Abb. 3.2). Diese Separation dient einerseits der Beherrschbarkeit der Szenarienvielfalt, weil Szenarien eigenständig beschrieben werden können. Beispielsweise können alle theoretisch erdachten, simulierten oder in der Realität aufgetretenen Varianten von Einscherszenarien in einer Datenbank ohne Berücksichtigung der Bewertung ergänzt werden. Durch die Kopplung können die Risiken in diesen neuen Szenarien dennoch auf Basis der bereits definierten Funktionsspezifikation und Risikomodellierung automatisch bewertet werden. Andererseits ist die Separation für die automatische Bewertung der aktuellen Funktionsspezifikation notwendig, wie bereits in Abschnitt 3.1 begründet. Wird beispielsweise die Funktionsspezifikation für Reaktionen auf Einscherer aufgrund neu identifizierter Szenarien angepasst, muss diese Anpassung nicht für jedes Szenario einzeln durchgeführt werden, sondern wird automatisch zu allen relevanten Szenarien zugeordnet.

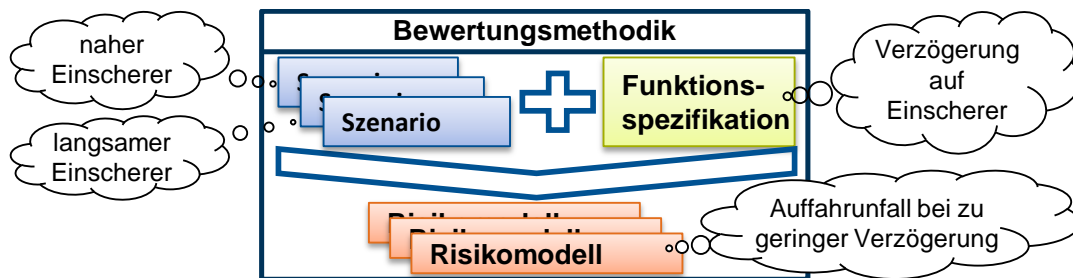


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der Separation in Szenarien, Funktionsspezifikation und Risikomodell mit Beispielen für die einzelnen Bestandteile

Während die Separation Vorteile bei der Modellierung der Bestandteile bringt, ergibt sich die Herausforderung, die Modellbestandteile wieder zusammenzufügen. Klassischerweise wird das bei Risikobewertungen durch Betrachtung aller kombinatorischen Möglichkeiten umgesetzt. Die manuelle Auswahl der relevanten Kombinationen ist dabei nur durch starke Abstraktion und Eingrenzung des Betrachtungsgegenstands möglich. Da diese Einschränkungen der Zielsetzung dieser Arbeit widersprechen, wird eine automatische Verknüpfung der drei separierten Modellteile entwickelt. Bei der Verknüpfung muss berücksichtigt werden, dass das Verhalten des Systems vom aktuellen Szenario abhängt und die entstehenden Risiken von der Kombination aus Szenario und spezifiziertem Systemverhalten abhängen (Abb. 3.2). Deshalb muss die automatische Verknüpfung der drei Bestandteile auf Basis der Szenarien erfolgen. Diese wird mit Hilfe einer Ähnlichkeitssuche auf dem formalen Szenarienraum *ScSp* umgesetzt. In diesem werden sowohl Szenarien als auch Szenarienbedingungen für Verhaltensweisen und Risiken definiert. Im vorliegenden Beispiel wird für die Funktionsspezifikation der Einschererreaktion definiert, dass diese für alle Szenarien, die einen Einscherer vor dem HAV beinhalten, relevant ist. In Abb. 3.3 sind diese Definitionen im *ScSp* durch die elliptischen Mengen schematisch dargestellt. Jedes beschriebene Szenario in der Datenbank entspricht damit einem Bereich im *ScSp* (1). Ausgehend von diesem Bereich kann durch die Szenarienbedingungen das relevante Systemverhalten identifiziert werden (2). Im Beispiel liegen alle Einschererszenarien im Relevanzbereich des Verhaltenmodells, weil diese eine Beschreibung eines vor dem HAV einscherenden Fahrzeugs beinhalten. Durch das zugeordnete Verhalten ergibt sich eine Anpassung des beschriebenen Bereichs (3), weil dadurch beispielsweise eine Verzögerung des HAV zum Szenario ergänzt wird. Anschließend können die dafür relevanten Risikomodelle zugeordnet werden (4). Das kann im Beispiel einerseits ein Risikomodell für den Auffahrunfall auf den Einscherer sein und andererseits, aufgrund der ausgelösten Verzögerung des HAV, auch ein potenzieller Auffahrunfall durch nachfolgenden Verkehr.

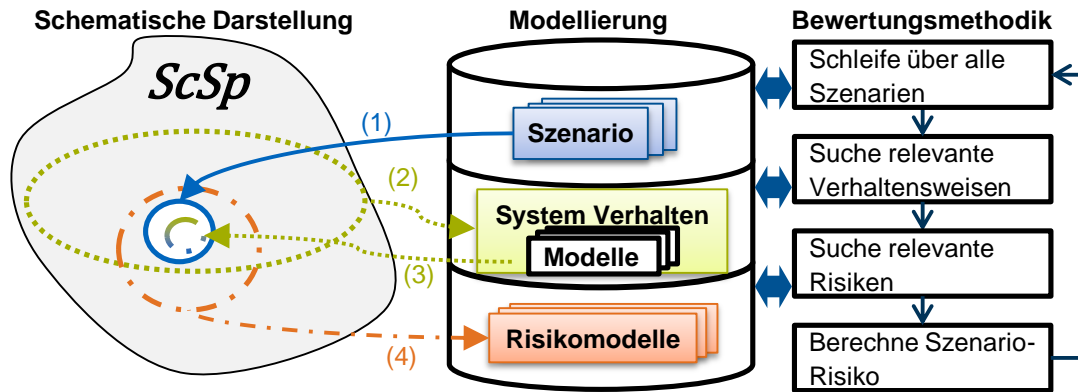


Abb. 3.3: Schematische Darstellung der Verknüpfung der einzelnen Modellbestandteile auf Basis des Szenarienraums *ScSp* entlang der Bewertungsmethodik

3.2.2 Formaler Szenarienraum

Die Basis der Methodik stellt eine formale Beschreibung des Szenarienraums *ScSp* dar, dessen Grundidee hier vorgestellt wird. Die detaillierte Beschreibung der Umsetzung erfolgt in Kapitel 4. In *ScSp* gilt generell die „Open World Assumption“ [61, S. 995], die besagt, dass alles, was nicht explizit definiert ist, als beliebig angenommen wird. Demnach entspricht eine Beschreibung im *ScSp* einer Einschränkung von Freiheitsgraden und somit einer bestimmten Teilmenge dieses Raums. Je detaillierter ein Szenario beschrieben ist, desto kleiner ist die beschriebene Teilmenge. Durch die Open World Assumption sind nicht mehr alle Regeln der mathematischen Mengenlehre anwendbar. Im Anhang A.2 findet sich eine Beschreibung der verwendeten, mathematischen Zusammenhänge des *ScSp*. Da alle Beschreibungsmöglichkeiten der Szenarienbeschreibung zur Eingrenzung verwendet werden können, ergibt sich ein fließender Abstraktionsgrad für alle Aspekte von Szenarien. Durch die Open World Assumption ist eine vollständige Beschreibung aller Szenarien zumindest auf einer hohen Abstraktionsebene möglich. Eine aussagekräftige Risikobewertung ist allerdings erst auf detaillierteren Ebenen möglich, weshalb die nicht definierten Bestandteile bei der Risikobewertung auf abstrakter Ebene durch (Worst-Case-) Annahmen abgedeckt werden müssen. Beispielsweise ist die Risikobewertung von einem abstrakten Einscherer nur möglich, wenn für dessen Abstand und Relativgeschwindigkeit gewisse Annahmen getroffen werden oder diese in einem detaillierteren Szenario explizit modelliert sind.

Auf Basis der formalen Beschreibung können Instanzen im Szenarienraum miteinander verglichen und sich überschneidende Bereiche identifiziert werden (Abb. 3.3 links). Damit wird modelliert, dass das System unter bestimmten Szenarienbedingungen definierte Verhaltensweisen ausführt bzw. Risiken auftreten können.

Nach der Definition von Szenarien aus Kap. 2.1.3 können diese auch das detaillierte Verhalten des HAV beinhalten. Um die Spezifikation des Funktionsverhaltens effizient anpassen und diese auch anhand von Szenarien bewerten zu können, ist das zu bewertende Funktionsverhalten hier explizit nicht Teil des originalen Szenarios. Die Szenarien geben den Rahmen vor, in dem sich das Funktionsverhalten bewegen kann. Dieser kann einerseits losgelöst vom Verhalten des HAV sein, wenn nur Aspekte beschrieben werden, die unabhängig vom HAV Verhalten sind, wie beispielsweise der Verlauf einer Straße. Andererseits kann aber auch ein Teil des HAV Verhaltens explizit im Szenario festgeschrieben werden, um beispielsweise die Annäherung des HAV an einen Einscherer als Teil eines Szenarios zu definieren. Damit ist es

möglich, komplexe Wechselwirkungen zwischen HAV-Verhalten und Szenarien explizit zu modellieren.

Allerdings verändert das HAV-Verhalten den beschriebenen Szenarienbereich, weil das definierte Egoverhalten hinzukommt. Der ursprüngliche Bereich des Szenarios wird durch das Verhalten verändert, wie in Abb. 3.3 (3) angedeutet. Für die Auswahl der Risiken ist dieser kombinierte Bereich relevant. In der Umsetzung wird deshalb für jedes Verhaltensmodell auch eine formale Beschreibung der notwendigen Szenarienanpassung definiert, die dann auf die jeweiligen Szenarien angewendet wird. Die Zuordnung der Risiken erfolgt anschließend anhand der modifizierten Szenarien.

3.2.3 Abstraktionsebenen der Modellierung

Für eine durchgehende Nutzung während der Entwicklung müssen sowohl erste Abschätzungen (A1) als auch detaillierte Bewertungen (A2) in der Modellierung abgebildet werden. Aufgrund der Komplexität des Problems und der Systementwicklung ist eine sukzessive Detaillierung der Bewertungen notwendig. Deshalb müssen die Bestandteile der Methodik auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen beschrieben werden können.

Im vorherigen Abschnitt ist die frei wählbare Abstraktion bei der Szenariendefinition bereits eingeführt. Bei der Modellierung von Funktionsverhalten und Risikobewertung ist zusätzlich der Abstraktionsgrad der Modellierung relevant. Zur klaren Unterscheidung dieser beiden Dimensionen der Abstraktion wird die Detaillierung der Szenarien als Spezialisierung und die Detaillierung der Modelle als Konkretisierung bezeichnet. Während die Spezialisierung stufenlos in allen Dimensionen des *ScSp* möglich ist, erscheint diese Flexibilität für die Modellierung des Verhaltens und der Risiken nicht notwendig. Demnach werden vier unterschiedliche Konkretisierungslevel (CL) der Verhaltens- und Risikomodelle definiert (Abb. 3.4). Der abstrakteste Level CL0 beinhaltet lediglich eine qualitative bzw. semiquantitative Beschreibung. Dabei können Verhaltensweisen oder Risiken rein textuell angelegt werden und ggf. mit den bekannten Skalen zur Risikoabschätzung belegt werden. Diese Ebene dient dazu, frühe Ergebnisse von klassischen Gefährdungsanalysen als Basis für spätere Detailanalysen zu integrieren. CL1 beschreibt die Modellierung von qualitativen bzw. semiquantitativen Zusammenhängen zwischen Risiken und Verhaltensweisen. Auf CL2 können auf Basis von zeitkonstanten Modellen die Risiken in Abhängigkeit vom Szenario (*sc*) sowie dem Systemverhalten (*Sb*) modelliert werden. Demnach können die ersten Einschätzungen von CL0 und CL1 durch Modellierung der relevantesten Aspekte verfeinert werden. Im detailliertesten und damit konkretesten Level CL3 können durch zeitabhängige Simulation beliebig komplexe Risikozusammenhänge abgebildet werden.

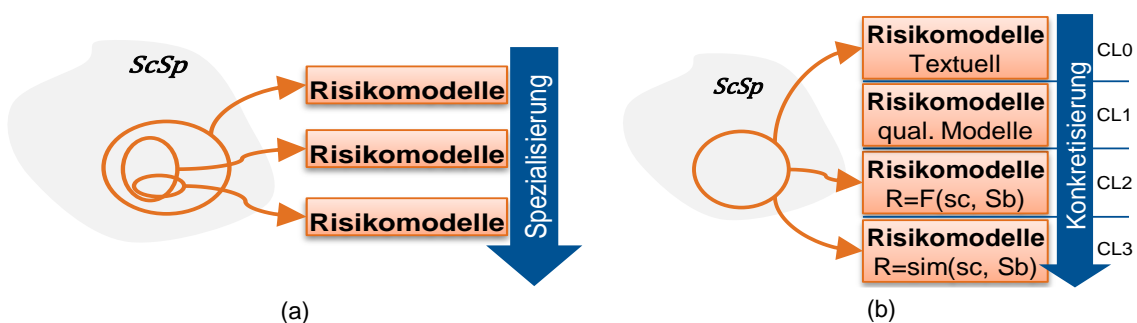


Abb. 3.4: (a) Spezialisierung beschreibt frei wählbare Detaillierung der Szenarienbedingungen der Modelle im Szenarienraum (b) Konkretisierung beschreibt stufenweise Detaillierung der Modellierungsart

Beim Verhalten gibt es außerdem noch unterschiedlich detaillierte Modellierungsebenen des Systems. Entscheidend ist im Rahmen dieser Arbeit immer das Verhalten auf Fahrzeugebene. Dieses kann im einfachsten Fall auf Gesamtsystemebene beschrieben oder modelliert werden. Das entspricht demnach Spezifikationen der Kundenfunktion bzw. des Gesamtsystems. Das hier betrachtete System setzt sich allerdings durch eine Vielzahl von einzeln entwickelten Komponenten zusammen. Da viele Einschränkungen der System-Leistungsfähigkeit auf Komponentenebene entschieden werden, ist bei der Verhaltensmodellierung zusätzlich auch die Modellierung des Zusammenspiels von einzelnen Komponenten notwendig. Aus diesem Grund wird beim Verhalten zusätzlich die Unterscheidung von System- und Komponentenebene eingeführt.

Bei der Risikobewertung gibt es neben dem Konkretisierungslevel noch eine zweite Dimension. Eine große Herausforderung beim Straßenverkehr ist die Abhängigkeit zwischen unterschiedlichen Risiken. So sinkt beispielsweise durch dynamischere Ausweichmanöver das Risiko, mit auftauchenden Hindernissen zu kollidieren, allerdings könnte dafür das Risiko von Unfällen infolge eines Kontrollverlustes steigen. In der Risikobewertung werden solche gegenseitigen Einflüsse häufig vernachlässigt und die Risiken einzeln bewertet. Während das für eine frühe Abschätzung sicherlich sinnvoll ist, sollte im Laufe der Präzisierung der Modellierungen die Möglichkeit bestehen, solche Zusammenhänge abzubilden. Aus diesem Grund werden die Risikoabhängigkeitslevel (RA) eingeführt, wobei bei RA1 Unabhängigkeit angenommen wird, bei RA2 explizit einzelne bekannte Abhängigkeiten abgebildet werden und bei RA3 idealerweise alle Risiken ganzheitlich behandelt werden.

Die Bestandteile der Bewertungsmethodik sollen im Laufe der Entwicklung angepasst werden können. Dafür sind Korrekturen, Konkretisierungen und Spezialisierungen an den Modellen notwendig. Korrekturen beinhalten das Ausbessern von Fehlern in der Modellierung sowie Anpassungen der Funktionsauslegung. Konkretisierungen bezeichnen eine detailliertere Modellierung ggf. auf einem tieferen Konkretisierungslevel. Das hat zur Folge, dass für dieselbe Problemstellungen mehrere Modelle auch auf unterschiedlichen Konkretisierungsleveln vorliegen können. Da die Modelle mit zunehmender Konkretisierung immer detaillierter werden, ist die Verwendung des konkretesten passenden Modells notwendig.

Spezialisierungen sind zusätzliche oder geänderte Modelle auf einer Untermenge des Szenarienraums des bisherigen Modells. Diese bilden somit spezielle Verhaltensweisen oder auch Risiken ab, die nur unter zusätzlichen Szenarienbedingungen relevant sind. Am Beispiel Einscherer könnte in einem ersten Schritt das generelle Annäherungsverhalten definiert werden und darauf aufbauend, das Verhalten für besonders kritische Naheinscherer zusätzlich durch ein geringes laterales Ausweichen und Hupen spezialisiert werden. Dadurch ergeben sich die Herausforderungen für die entwickelte Methodik, sowohl mit unterschiedlich konkreten als auch mit unterschiedlich spezialisierten Modellen umgehen zu können.

Die Beschreibung von Szenarien, Verhalten und Risiken erfolgt getrennt voneinander. Deshalb können diese auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen vorliegen. Jedoch ist beispielsweise eine quantitative Risikoberechnung nicht auf Basis von rein qualitativen Szenariendaten möglich. Aus diesem Grund muss jeweils berücksichtigt werden, welchen Detailgrad die Einzelmodelle aufweisen. Es muss demnach immer das konkreteste und spezialisierteste Modell verwendet werden. Dadurch lassen sich aber auch Spezifizierungslücken identifizieren, wenn beispielsweise für ein detailliertes Risikomodell passende Verhaltensmodelle fehlen.

3.2.4 Methodisches Vorgehen zur Erstellung und Bewertung

Für die Anwendung der entwickelten Technik müssen die Methode zur Bewertung und die Methode zum Vervollständigen der Bestandteile unterschieden werden.

Erstere ergibt sich direkt aus dem Aufbau des Bewertungsmodells (Abb. 3.3 rechts). Für jedes Szenario werden auf Basis der Szenarienbedingungen die relevanten Verhaltensweisen ausgewählt. Die Kombination aus Szenario und Systemverhalten wird anschließend mit den relevanten Risikomodellen ausgewertet. Dadurch kann für jedes Szenario eine Risikoabschätzung auf Basis der aktuell gültigen Systemdefinition berechnet werden. Dieses Vorgehen wird durch das implementierte Matlab-Tool bei den qualitativen Modellen unterstützt und bei den quantitativen Modellen automatisiert durchgeführt.

Dagegen ist bei dem Vervollständigen der Modellierung eine größere Methodenvielfalt anwendbar. Um eine möglichst vollständige Bewertung von auftretenden Risiken zu erreichen, unterstützt die entwickelte Technik das iterative Ergänzen und Präzisieren der Inhalte. Je nach Anwendungsfall können dadurch unterschiedliche Methoden angewendet werden. Durch die unabhängige Modellierung von Szenarien, Verhaltensweisen und Risikomodellen sind diese auch unabhängig erstellbar.

Generell lässt sich die Methode zum Vervollständigen in zwei Phasen unterteilen. In der ersten Phase der initialen Identifizierung geht es darum, auf abstrakter Ebene eine möglichst umfassende Sammlung von Szenarien, Verhalten und Risiken zu identifizieren. Dafür können klassische Vorgehensweisen der Systemauslegung oder der Gefährdungsanalysen verwendet werden (Abb. 3.5 oben). In der zweiten Phase müssen diese Ergebnisse durch Modellierung im Szenarienraum in die Technik integriert und schrittweise ergänzt und detailliert werden. Durch die unabhängige Modellierung der drei Bestandteile Szenarien, Verhalten und Risiken unterstützt die Technik zahlreiche Vorgehen zur Präzisierung der Modellierung (Abb. 3.5). Fehlende Aspekte können einerseits automatisch identifiziert werden, wie beispielsweise fehlende Verhalten in einem Szenario, und andererseits auch bei der Anwendung auffallen, wie beispielsweise fehlende Risikomodelle bei der Betrachtung eines Unfallszenarios.

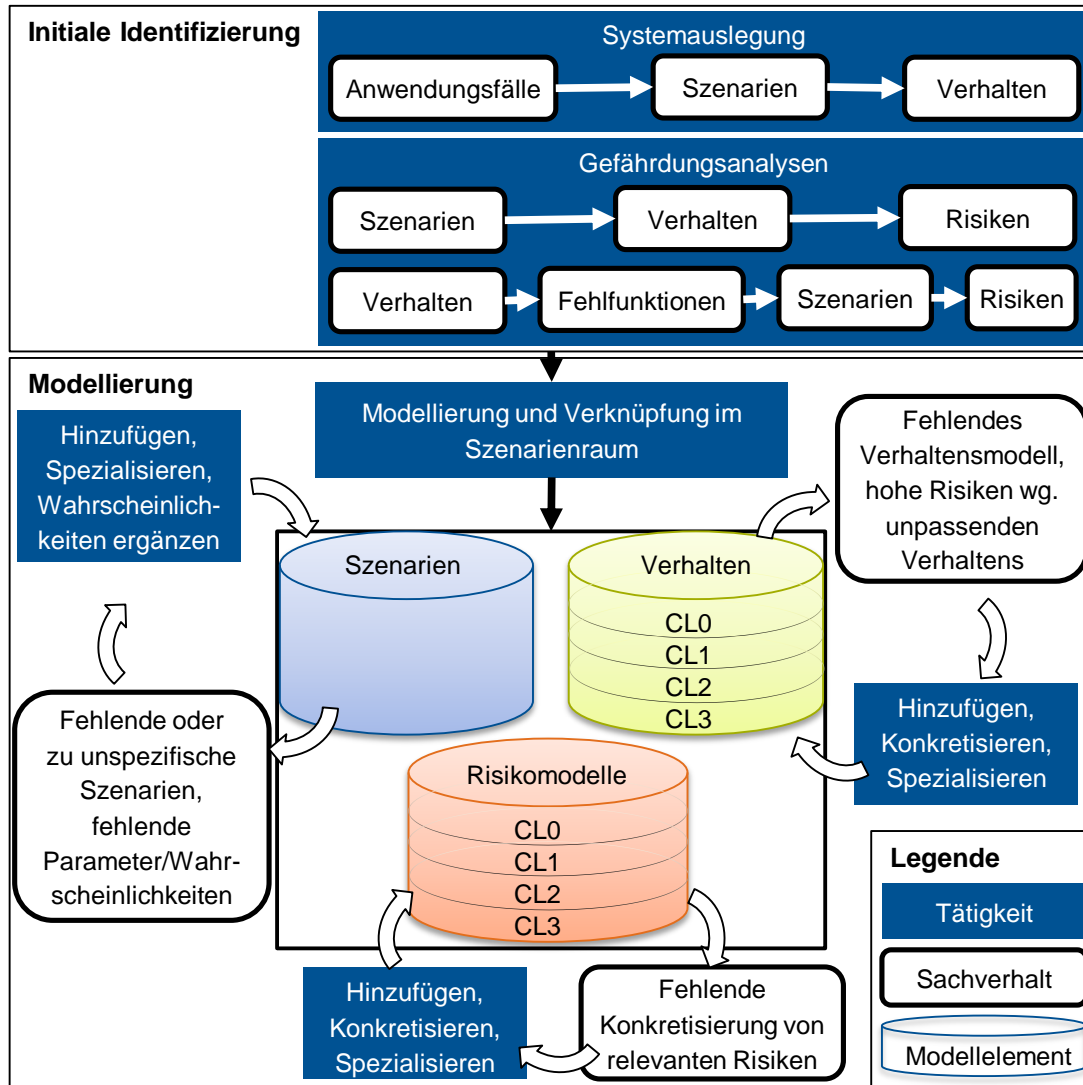


Abb. 3.5: Ablaufdiagramm der unterschiedlichen möglichen Vorgehensweisen zum Erstellen, Erweitern und Präzisieren der Modellierungen der Risikobewertung

Neben den abgebildeten, intendierten Vorgehensweisen zur schrittweisen Verbesserung der Modellierung können auch jederzeit Aspekte von außen eingebracht werden. So ist es beispielsweise möglich, dass in einer zentral genutzten Szenariendatenbank neue Szenarien entstehen oder das Systemverhalten um weitere Funktionalitäten erweitert wird. Durch dieses Hinzufügen von Einzelbestandteilen wird das Gesamtmodell schrittweise komplettiert.

4 Formale Szenarienbeschreibung

Die Grundlage der hier vorgestellten Risikobewertung ist eine formale Beschreibung von Szenarien, weil sowohl das erwartete Funktionsverhalten als auch die Entstehung von Gefahren vom aktuellen Szenario abhängen. In diesem Kapitel wird aufbauend auf den Ansätzen in der Literatur eine neu entwickelte, hierarchische Szenarienbeschreibungssprache (Hierarchical Scenario Description Language: HSDL) vorgestellt, die eine formale Beschreibung von Szenarien auf beliebigen Abstraktionsebenen ermöglicht. Anschließend wird eine Ähnlichkeitssuche auf diesem Szenarienraum entwickelt, um die einzelnen Bestandteile der Risikobewertung automatisch miteinander verknüpfen zu können. Zum Abschluss des Kapitels werden die HSDL und die Ähnlichkeitssuche anhand von ausgewählten Beispielen bewertet.

4.1 Stand der Wissenschaft

Es gibt für die Beschreibung von Verkehrsszenarien und im Bereich der Ähnlichkeitssuche mehrere relevante Veröffentlichungen, die im Folgenden strukturiert und bewertet werden. Erste Ideen [62] und das Konzept [60] der Beschreibungssprache dieser Arbeit wurden bereits vorveröffentlicht.

4.1.1 Szenarienbeschreibung

Ein Szenario ist nach der Definition in Abschnitt 2.1.3 eine Beschreibung einer gewissen Abfolge von Situationen. Es gibt zahlreiche unterschiedliche Ansätze, wie diese Beschreibung umgesetzt werden kann. Dabei ist ein wichtiges Unterscheidungskriterium, wie formal oder informell die Beschreibungsform ist.

Die wohl am häufigsten verwendete Beschreibungsform von Verkehrsszenarien ist die textuelle Beschreibung mit natürlicher Sprache, häufig noch kombiniert mit einer oder mehrerer schematischer Abbildungen einzelner Szenen aus der Vogelperspektive. Ein Beispiel dafür liefert Schaller [63] mit einem Katalog von Situationen für Stauassistenz. Der Vorteil der maximalen Flexibilität bei der Beschreibung steht allerdings im Gegensatz zu den Nachteilen, wie der schwierigen automatisierten Interpretation der Beschreibung sowie möglichen Missverständnissen oder unvollständigen Beschreibungen.

Um die Beschreibungen besser zu strukturieren und damit über Entwicklerteams vergleichbarer zu machen, stellen Bengler et al. [64] im Rahmen vom Forschungsprojekt URBAN die Beschreibungsform des Assistenzszenarios vor. Dabei wird eine Struktur mit den Dimensionen Situation, Fahrer und Funktion sowie jeweils zahlreichen Kategorien wie beispielsweise Situationsbeschreibung, Manöver, Fahreraufgabe etc. vorgegeben. Diese dient bei der textuellen Beschreibung als Checkliste und führt dadurch zu vollständigeren und vergleichbareren Beschreibungen.

Einen entscheidenden, auch bei der Szenariendefinition von Ulbrich [28] verwendeten Beitrag zur besseren Strukturierung der Szenarienbeschreibung stellt die Ontologie von Geyer [65] dar. Zwei wichtige Gedanken sind dabei, Szenarien durch eine Top-Down-Methode zu definieren und diese nur so detailliert zu beschreiben, wie es für die aktuelle Anwendung nötig ist [65, S. 188]. Neben der Gesamtstrukturierung präsentiert er in seiner Dissertation auch Beispiele für Merkmale der Szenenelemente [66, S. 154]. Allerdings führt das Erstellen von einzelnen Katalogen für Szenen, Situationen, Anwendungsfällen und Szenarien [65, S. 188] zu einer Explosion der möglichen Kombinationen. Diese durch die Beschränkung des Betrachtungsumfangs einzugrenzen ist allerdings nur bei sehr spezifischen Untersuchungen möglich.

Bagschik [67] leitet aus der ISO26262 Anforderungen an Szenarien in den jeweiligen Entwicklungsphasen Konzeptphase, Systementwicklung und Testprozess ab. Dabei schlägt er für die Definition der Funktionalen und Logischen Szenarien einige ähnliche Aspekte vor, wie beispielsweise eine semiformale Beschreibung, ein einheitliches Vokabular sowie die Integration von Parameterbereichen mit Wahrscheinlichkeitsfunktionen. Der Ansatz zeichnet sich durch eine klare Definition und Unterscheidung von funktionalen und logischen Szenarien aus. Die dabei vorgeschlagenen Aspekte der und Anforderungen an die Szenarien können durch den hier entwickelten Ansatz auch ohne diese Unterscheidung abgebildet werden.

Eine weitere Detaillierung der Szenarienbeschreibung stellt das 4 Ebenen Modell von Schuldts [68] dar. An dem Aufbau von Simulationen orientiert, werden die vier Ebenen „das Straßennetzwerk, situationsspezifische Anpassungen, das Verhalten der dynamischen Fahrzeuge und die Umweltbedingungen“ [68, S. 174] schrittweise überlagert. Die Trennung dieser Ebenen sorgt für eine klare Strukturierung, allerdings ist dieser schrittweise Aufbau aufgrund der festgelegten Reihenfolge wenig flexibel und erschwert beispielsweise die Beschreibung eines Verhaltens unabhängig von der Infrastruktur.

Domsch [69] präsentiert eine formale, textuelle Beschreibung von Referenzfahrtsituationen, um über alle Entwicklungsphasen hinweg ein einheitlicheres Verständnis zu ermöglichen. Dabei definiert er neben der Struktur aus Fahrer, Fahrzeug und Umwelt auch Listen der Begriffe, die dann entsprechend kombiniert werden können. Darüber hinaus empfiehlt er eine automatische Filterung von unsinnigen Kombinationen der Begriffe.

Kemmann und Trapp [41] nutzen in ihrem Risikobewertungsansatz eine formale Situationsmodellierung auf Basis von Listen mit Einflussfaktoren. Diese Faktoren werden mit Hilfe einer Ontologie verwaltet, um einerseits aufgrund der Klassenzugehörigkeit zugehörige Informationen abzubilden und andererseits Ähnlichkeiten zwischen den Situationen ermitteln zu können. Ebenfalls zur Generierung von Betriebssituationen für G&Rs schlägt Reinbold [32, S. 145] die Kombinatorik von Manövern, Infrastruktur und Verkehrsteilnehmern aus jeweiligen Katalogen vor. Adler [55] nutzt ebenfalls eine formale Beschreibung von Situationen für seine Sicherheitsanalyse von autonomen Fahrzeugen. Wie bei den in dieser Arbeit formulierten Anforderungen, fordert er aufgrund der großen Menge an Situationen eine formale Spezifikation und die Wahl des richtigen Abstraktionsgrades [55, S. 201]. Allerdings beschränkt er sich auf eine grobe Einteilung der Situationen und Verhaltensweisen, damit diese mit allen Verhalten kombiniert werden können. Diese Einteilung ist jedoch für detailliertere Betrachtungen nicht ausreichend.

Ein wichtiger Bestandteil bei der Beschreibung von Verkehrsszenarien sind die durchgeführten Manöver der beteiligten Verkehrsteilnehmer. In zahlreichen Veröffentlichungen werden Manöverlisten definiert, die zur Erfüllung bestimmter Fahraufgaben notwendig sind [70–73]. Die Definitionen sind dabei ähnlich, je nach Anwendungsfall unterscheiden sich diese lediglich

in der Detaillierung bzw. im Betrachtungsumfang, widersprechen sich allerdings nicht. Jedoch wird häufig die Einschränkung getroffen, dass die Manöver disjunkt sind, also jeweils nur ein Manöver aktiv sein kann [72, S. 32]. Neben den erwähnten Werken zur generellen Manöverbeschreibung gibt es noch detaillierte Beschreibungen in Arbeiten, die speziell auf die Untersuchung einzelner Manöver fokussiert sind, wie beispielsweise die Analyse von Fahrstreifenwechseln von Fastenmeier [74].

Zur Darstellung von Abfolgen möglicher Manöver entwickelte Nagel [75] Situationsgraphenbäume die er mit Hilfe einer unscharfen, zeitlogischen Modellierungssprache formal beschreibt. Diese Modellierung wird auch von Hakuli [76] zur Beschreibung der Manöver des eigenen Fahrzeugs verwendet. Durch die explizite Modellierung der Abfolgen ergibt sich allerdings schnell eine komplexe und umfangreiche Darstellung, obwohl lediglich das eigene Verhalten abgebildet wird.

Die bisherigen Konzepte dienen größtenteils der theoretischen oder simulativen Situations- oder Szenarienbeschreibung. Darüber hinaus gibt es auch zahlreiche Konzepte, die Situationen oder Szenarien für eine Echtzeit-Klassifikation im Fahrzeug beschreiben. Hermann und Desel [77] nutzen für eine Echtzeit-Situationserkennung die Unterteilung in Aktionen, Interaktionen und Regulierungen. Die Aktionen basieren auf den von Tölle [71] definierten Manövern des Ego-Fahrzeugs. Die Interaktionen Folgen, Annähern oder Passieren werden als Beziehung zwischen zwei Fahrzeugen definiert, wobei nur Beziehungen mit dem Ego-Fahrzeug berücksichtigt werden. Unter Regulierungen werden die Verkehrsregeln bezogen auf die aktuelle Domäne verstanden [77, S. 217].

Hulsen [61] nutzt Ontologien zur Beschreibung von komplexen Kreuzungsszenarien. Die Interaktionen und Zusammenhänge zwischen Szenarienelementen wie Fahrzeugen, Fahrstreifen und Verkehrszeichen werden detailliert auf Basis von hierarchisch definierten Klassen beschrieben. Durch die logische Abbildung von Verkehrsregeln können aus einer beschriebenen Situation die aktuellen Vorfahrtberechtigungen abgeleitet werden.

Vacek [78] präsentiert einen Ansatz zur fallbasierten Steuerung eines Fahrzeugs, für den er eine Modellierung der Fälle bzw. Situationen mit Hilfe einer Ontologie nutzt [79, 80]. Die Ontologie zur Situationsbeschreibung umfasst die Aspekte Infrastruktur, Verkehrsteilnehmer, Verhaltensweisen und Verkehrsregeln. Er nutzt eine hierarchische Modellierung der Verhaltensweisen und Situationen, um unterschiedliche Spezialisierungsgrade abbilden zu können. In diesem Ansatz werden jedoch nur Situationen und keine Szenarien verwaltet. Die zeitliche Abfolge wird dort vereinfacht über die diskrete Aneinanderreihung dieser Situationen abgebildet.

Die modellbasierte Szenarienbeschreibung von Bach et al. [81] ähnelt dem hier präsentierten Ansatz. Diese soll die Entwicklung und den Test von automatischen Fahrfunktionen vereinfachen. Das Konzept sieht ebenfalls eine abstrakte Beschreibung von Szenarien vor, die maschinenlesbar und menschlich verständlich ist. Das Konzept basiert auf einem Domänenmodell und einem Regelset und sieht neben der Editierung durch den Benutzer auch das automatische Generieren von Szenarien auf Basis von Messdaten vor (Abb. 4.1). Allerdings nutzt Bach nur ein grobes Konkretisierungslevel. Die dabei vernachlässigten Informationen sollen bei der Parametrisierung hinzugefügt werden, die nicht näher beschrieben ist. Außerdem verwendet er wie in vielen vorgestellten Ansätzen die vom Film entlehnte Abfolge von einzelnen Szenen (Abb. 4.2), die jeweils umfangreiche Szenenbeschreibungen für die einzelnen Situationen benötigt.

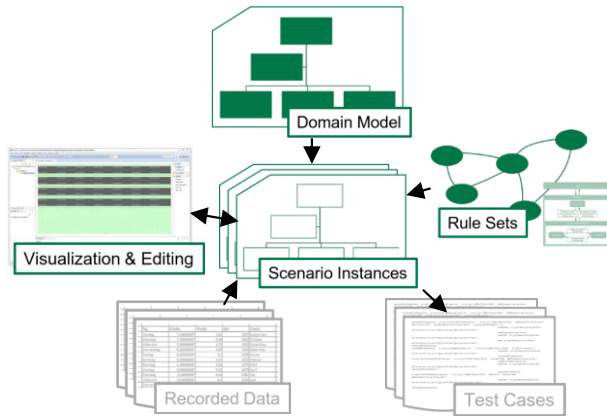


Abb. 4.1: Grundsätzliches Konzept der Szenarienschreibung von Bach nach [81, S. 1150]

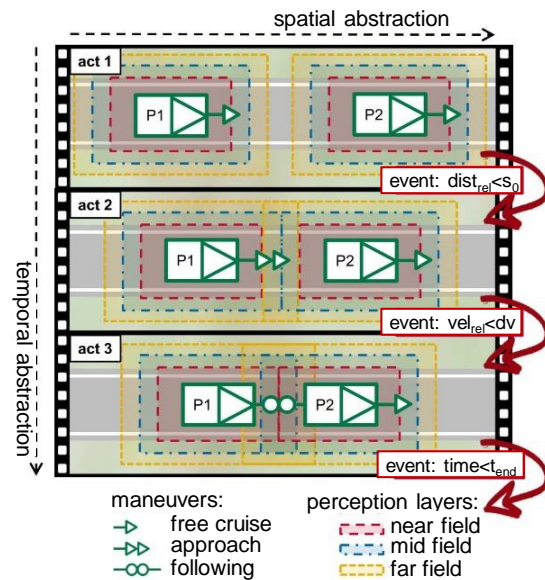


Abb. 4.2: Filmanalogie zur Abbildung von Abläufen nach [81, S. 1152]

Neben der Beschreibungsart existieren auch unterschiedliche Ansätze zur Befüllung solcher Beschreibungen. Generell reichen diese von Expertenwissen über Kombinatorikansätze [69, 82, S. 46-47] bis hin zu Konzepten zur automatischen Erstellung aus Messdaten [81] oder Simulationen [48].

Zusammenfassend ist dem Autor zum aktuellen Zeitpunkt keine veröffentlichte Umsetzung für die hier benötigte Szenarienschreibungssprache bekannt. Der Ansatz von Bach et al. [81] kommt der hier benötigten Beschreibungsform am nächsten. Trotz der unabhängigen und parallelen Entstehung der Konzepte sind viele Anforderungen und Konzeptideen ähnlich. Ein entscheidender Unterschied ergibt sich aber in der festen Wahl der Abstraktionsebene bei Bach. Für die hier entwickelte Risikobewertung während der Entwicklungsphase wird einerseits eine sukzessive Detaillierung der Szenarien und andererseits auch die gemischte Beschreibung auf unterschiedlichen Ebenen benötigt. Beispielsweise muss ein bestimmter Verkehrsteilnehmer und dessen Verhalten detailliert beschrieben werden, während bei einem weiteren Teilnehmer eine grobe Beschreibung ausreichend ist. Die anderen hier erwähnten Werke liefern teilweise Vorarbeiten für einzelne Aspekte der Beschreibungssprache oder decken sich mit den bei der eigenen Entwicklung getroffenen Annahmen und erzielten Erkenntnissen.

4.1.2 Ähnlichkeitsmaße

Einen guten Überblick über Ähnlichkeitsmaße gibt Bergmann [83], von dem die folgenden Gedanken übernommen werden. Er definiert Ähnlichkeit als eine Funktion $sim: \mathbb{D} \times \mathbb{D} \rightarrow [0, 1]$ [83, S. 113], wobei 0 die geringste und 1 die größte Ähnlichkeit beschreibt. Entscheidende Eigenschaften von Ähnlichkeitsmaßen sind dabei die Reflexivität $sim(x, x) = 1, \forall x$ [83, S. 118] sowie die Symmetrie $sim(x, y) = sim(y, x), \forall x, y$ [83, S. 119]. Je nach Art der verglichenen Attribute können unterschiedliche Ähnlichkeitsmaße verwendet werden. So gibt es für binäre Attribute beispielsweise Ähnlichkeitsmaße, die die Anzahl der Unterschiede repräsentieren wie die Hamming Distance. Für numerische Attribute basieren die Ähnlichkeitsmaße häufig auf dem Konzept einer mathematischen Entfernung (z.B. City Block Metric, Euclidean Distance) [83, S. 122].

Um komplexe Strukturen miteinander zu vergleichen, kann das *Local-Global Principle* angewendet werden. Lokale Ähnlichkeitsmaße bewerten dabei jeweils einzelne Attribute, die dann mittels eines globalen Ähnlichkeitsmaßes zusammengefasst werden. Für die lokalen Ähnlichkeitsfunktionen stehen dabei unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. Die Bewertung von numerischen Attributen kann beispielsweise durch eine Differenzfunktion, wie die numerische oder logarithmische Differenz, erfolgen.

Neben numerischen Parametern besteht die hier verwendete Szenarienbeschreibungssprache auch aus Elementen oder Verhaltensweisen, die bei Bergmann unter der Bezeichnung Symbolische Attribute behandelt werden. Neben einfachen Ähnlichkeitsmaßen für unsortierte und global sortierte Symbolische Attribute wird auch auf die hier relevanten, taxonomisch sortierten Symbolischen Attribute eingegangen. Unter einer Taxonomie wird dabei eine Sortierung der Attribute in einer Baumstruktur verstanden, wie sie für die in der Beschreibungssprache definierten Elementen und Verhaltensweisen verwendet wird. Im Gegensatz zu Bergmann ist hier aufgrund der Erweiterbarkeit der Sprache zwar keine eindeutige Unterscheidung zwischen inneren Knoten und Blattknoten möglich, das grundsätzliche Konzept ist aber übertragbar. Es werden für jeden inneren Knoten Ähnlichkeitswerte definiert. Da ausgehend vom Wurzelknoten jeder Knoten eine weitere Gemeinsamkeit der tieferen Knoten beschreibt, muss dieser Ähnlichkeitswert mit zunehmendem Abstand zum Wurzelknoten monoton ansteigen. Dadurch kann die Ähnlichkeit zwischen zwei beliebigen Knoten durch den Ähnlichkeitswert des kleinsten gemeinsamen Vorgängers definiert werden.

Das für taxonomische Symbolische Attribute verwendete Ähnlichkeitsmaß kann auch für den Vergleich von Klassenobjekten verwendet werden. Bergmann bezeichnet diesen Vergleich der Klassenhierarchie als inter-class Ähnlichkeitsmaß. Das wird in Kombination mit der intra-class Ähnlichkeit, die für jede Klasse einzeln definiert sein kann und auf die kleinste gemeinsame Klasse angewendet wird, zu einem Ähnlichkeitsmaß für Objekte [83, S. 143].

Ansätze zum Vergleich von Graphen [83] [84] berücksichtigen dagegen in erster Linie deren Struktur und nicht deren Inhalt, weshalb diese hier nicht weiter betrachtet werden. Darüber hinaus hat die HSDL den Vorteil einer festen Struktur, wodurch bei der Zuordnung geringere Unsicherheiten herrschen als beim Vergleich von frei definierbaren Schemata. Zwar existieren auch für freie Schemata Lösungsansätze [85], jedoch soll dieser Interpretationsspielraum ja explizit nicht ermöglicht werden.

Die hier entwickelte Idee der Suche auf einem selbst definierten Szenarienraum entspricht im Prinzip einer Indexsuche, wie beispielsweise von Brauer [86] auf die Ähnlichkeitssuche von CAD-Modellen angewendet. Hier werden anstelle von CAD-Modellen Verkehrsszenarien durch Features beschrieben, auf denen der Vergleich bzw. die Suche durchgeführt wird.

In Bezug auf die Ähnlichkeit von Verkehrsszenarien sind die Ansätze von Reichart [87] und Vacek [80] interessant. Allerdings werden von Reichart keine Beziehungen zwischen Elementen berücksichtigt und der Vergleich wird durch Diskretisieren der Merkmale vereinfacht, wodurch nur noch ein festgelegter Abstraktionsgrad aufgelöst werden kann [87, S. 105]. Vacek vergleicht die Ähnlichkeit von in einer Ontologie abgebildeten Situationen und berücksichtigt dabei auch hierarchische Ähnlichkeit von Elementen [80, S. 143]. Durch die Beschränkung auf den Vergleich von Situationen sind allerdings zeitliche Aspekte nicht Teil seiner Ähnlichkeitssuche.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Grundlagen für das hier vorliegende Suchproblem bereits ausführlich behandelt sind, allerdings müssen diese noch auf die konkrete Problemstellung angepasst werden.

4.2 Anforderungen und Lösungskonzept

Aus den allgemeinen Anforderungen und dem Gesamtkonzept (Abschnitte 1.2 und 3.2) lassen sich folgende Anforderungen an die Szenarienbeschreibungssprache ableiten. Die Beschreibungssprache muss sowohl abstrakte (A_S1) als auch auf einzelne Aspekte konkretisierte Szenarien beschreiben können (A_S2). Dabei sollen Szenarien schrittweise detailliert werden können und somit ein fließender Abstraktionsgrad ermöglicht werden (A_S3). Um als Grundlage für die Risikobewertungsmethodik dienen zu können, müssen alle für das Systemverhalten und die Risikobewertung relevanten Aspekte durch die Szenarienbeschreibung beschrieben werden können (A_S4). Für die Nachvollziehbarkeit von Bewertungen sowie die manuelle Erstellung ist es notwendig, dass die Szenarienbeschreibung auch für Menschen interpretierbar ist (A_S5). Eine der größten Herausforderungen ist allerdings der Umgang mit der erwarteten Szenarienvielfalt. Einerseits muss die Erstellung einer möglichst umfassenden Szenarienvielfalt ermöglicht werden, indem Szenarien aus theoretischen Überlegungen, Simulationen, realen Daten oder Erfahrungen generiert werden können (A_S6). Um diese Vielfalt anschließend handhaben und bewerten zu können, muss die Szenarienbeschreibung andererseits ausreichend formal sein, um die Ähnlichkeit und Überlappungen zwischen Szenarien automatisch identifizieren zu können (A_S7). Durch diese Anforderung können die hier benötigten automatischen Verknüpfungen zwischen Verhaltensweisen, Risiken und Szenarien automatisch generiert werden.

Die Grundideen der dafür entwickelten formalen HSDL wurden bereits in [62] formuliert und in [60] und [8] detailliert. Aufgrund der großen Relevanz für die vorgestellte Methodik, werden im Folgenden die wichtigsten Aspekte kurz dargestellt. Das Lösungskonzept basiert auf einer definierten Beschreibungssprache. Diese lässt durch frei wählbare Abstraktionsgrade und Erweiterung der Sprachelemente eine umfassende Szenarienbeschreibung zu. Zur Beherrschung der Szenarienvielfalt sind dabei zwei Aspekte elementar. Einerseits können abstrakte Beschreibungen verwendet werden, die dann jeweils einen großen Anteil des möglichen Szenarienraums abdecken. Andererseits können durch einen automatisierten Vergleich des abgedeckten Bereichs der Szenarien die Beziehungen zwischen allen Szenarien identifiziert werden.

4.3 Formale Szenarienbeschreibungssprache

Zur Beschreibung von Szenarien wird in dieser Arbeit eine formale Sprache entwickelt. Eine formale Sprache L ist definiert als eine Menge von Zeichenreihen aus allen möglichen Zeichenreihen Σ^* über einem Alphabet Σ [88, S. 56].

$$L \subseteq \Sigma^* \tag{4.1}$$

Dabei ist ein Alphabet „eine endliche, nicht leere Menge von Symbolen“ [88, S. 54] und eine Zeichenreihe (oder auch Wort) „eine endliche Folge von Symbolen eines bestimmten Alphabets“ [88, S. 54].

Übertragen auf die hier entwickelte hierarchische Szenarienbeschreibungssprache (HSDL) ist diese auf einem Alphabet aus Elementen, Verhaltensweisen, Parametern und Ereignissen definiert. Die HSDL definiert, wie gültige „Wörter“ aus diesem Alphabet gebildet werden, was

im Folgenden als Grammatik der Sprache bezeichnet wird. Jede so erstellte Zeichenreihe beschreibt schließlich ein Szenario. Demnach definiert die Sprache eine formale Beschreibung von Szenarien.

Um die Szenarienvielfalt beherrschbarer zu machen, wird außerdem definiert, dass nicht näher definierte Aspekte eines Szenarios beliebig sein können. Eine solche Annahme wird als „Open World Assumption“ [61, S. 995] bezeichnet (Abschnitt 3.2.2). Damit werden durch jeden zusätzlich beschriebenen Aspekt die möglichen Freiheitsgrade des Szenarios weiter eingeschränkt. Semantisch beschreiben die Szenarien, also die Wörter der HSDL, damit jeweils eine Teilmenge an real auftretenden Verkehrsszenarien. Zur Beschreibung dieses Konzepts wird der Szenarienraum $ScSp$ definiert. Dieser Raum umfasst alle real auftretenden Verkehrsszenarien und ist dementsprechend beliebig komplex. Damit beschreibt jedes Szenario

$$sc \in HSDL \rightarrow sc \subseteq ScSp \quad (4.2)$$

eine Teilmenge des Szenarienraums. Theoretisch beschreibt die leere Zeichenreihe der HSDL ein Szenario ohne irgendwelche Einschränkungen und damit den gesamten $ScSp$. Je konkreter ein Szenario beschrieben ist, desto mehr Aspekte sind definiert und dementsprechend kleiner ist der beschriebene Bereich.

4.3.1 Grammatik der Szenarienbeschreibung

Aus der Szenariendefinition und dem Stand der Technik lassen sich eine Vielzahl an relevanten Aspekten für die Beschreibung von Szenarien ableiten. Um diese abbilden zu können, wurde eine generische Struktur aus Elementen, Verhaltensweisen, Parametern und Ereignissen für den Szenarienraum entwickelt. Elemente stellen dabei wichtige Aspekte eines Szenarios dar und können beispielsweise aus den Bereichen „Infrastruktur“ oder „dynamische Objekte“ stammen. Elementen können jeweils Verhaltensweisen zugeordnet werden. Dabei haben Elemente und Verhaltensweisen zugehörige Parameter und Ereignisse. Die Parameter dienen dazu, Elemente oder Verhaltensweisen näher zu spezifizieren und können dabei numerisch, als Aufzählung oder als Referenz auf andere Elemente definiert sein. Referenzparameter beschreiben damit Beziehungen zwischen Szenarienelementen. Die Ereignisse dienen abschließend dazu, den zeitlichen Ablauf eines Szenarios zu definieren. Durch eine logische, relative oder absolute zeitliche Abfolge der Ereignisse kann die Abfolge von Manövern und die zeitliche Gültigkeit von Parameterdefinitionen spezifiziert werden. Damit setzt sich ein Szenario aus endlich vielen Elementen, deren Verhaltensweisen, sowie den definierten Parametern und der Ereignisabfolge zusammen.

Bevor auf die Details des zugrundeliegenden Alphabets eingegangen wird, soll die Grammatik anhand eines einfachen Beispielszenarios veranschaulicht werden. Betrachtet wird ein durch ein verzögerndes Vorderfahrzeug motivierter Einscherer vor dem Ego-Fahrzeug auf einer mehrstreifigen Straße (Abb. 4.3 rechts). Die formale Beschreibung des Szenarios, also das Wort der HSDL, ist schematisch auf der linken Seite der Abbildung dargestellt. Demnach setzt sich das Szenario aus vier Elementen (drei Fahrzeugen und einer Straße) zusammen. Diese Elemente werden teilweise durch Parameter konkretisiert wie beispielsweise die Anzahl der Fahrstreifen oder die Art des Fahrzeugs. Dabei können für das Szenario irrelevante Informationen, wie beispielsweise die Art des verzögernden Fahrzeugs, weggelassen werden. Den Fahrzeug-Elementen sind in diesem Beispiel jeweils die Verhaltensweisen Anhalten, Fahrstreifenwechsel und Fahrstreifenfolgen mit teilweise näher spezifizierten Parametern

zugeordnet. Abschließend wird noch der relevante zeitliche Ablauf durch die Anordnung der beiden Ereignisse modelliert.

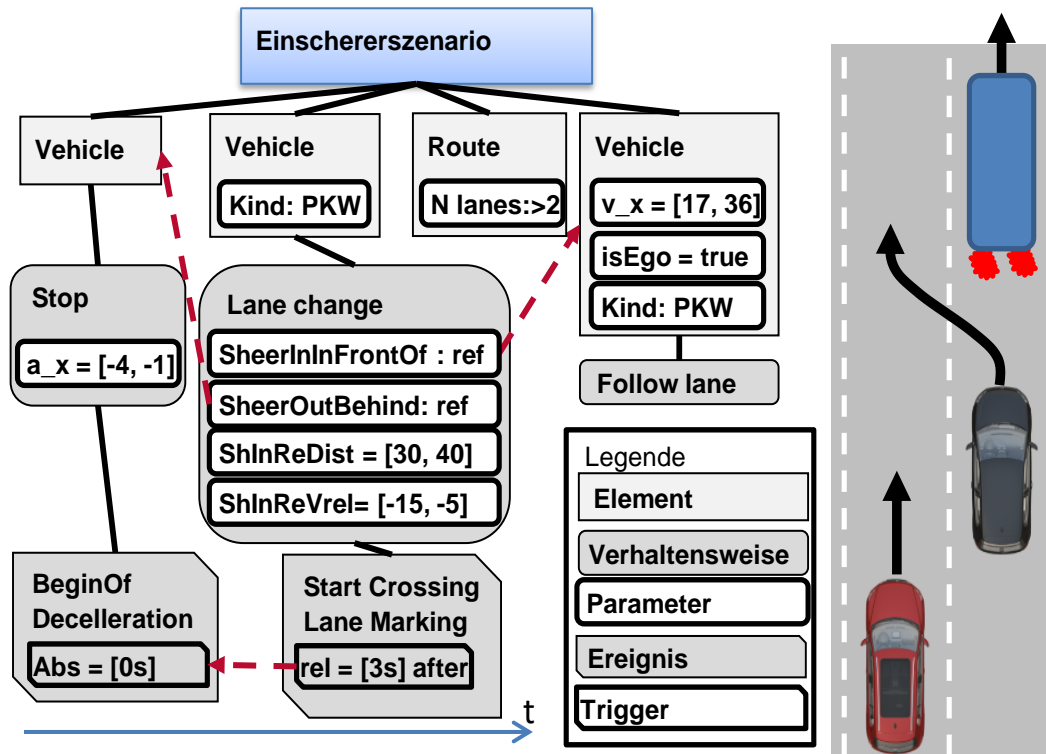


Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Beschreibung eines Beispielszenarios mittels Elementen, Verhaltensweisen, Parameter und Ereignisse (links) und schematische Abbildung des Szenarios aus der Vogelperspektive (rechts)

4.3.2 Alphabet der Szenarienbeschreibung

Eine wichtige Eigenschaft von Sprachen ist die Endlichkeit der Alphabete. „Sprachen können zwar eine unendliche Anzahl von Zeichenreihen enthalten, sie sind aber auf Zeichenreihen über einem festen, endlichen Alphabet beschränkt“ [88, S. 56]. Aufgrund der Herausforderung der Szenarienvielfalt soll das hier verwendete Alphabet zwar endlich, aber erweiterbar sein. Durch die explizite Erweiterbarkeit des zugrundeliegenden Alphabets, kann die HSDL beliebige Szenarien abbilden.

Als Alphabet der HSDL werden die definierten und zur Verfügung stehenden Elemente, Verhaltensweisen, Parameter und Ereignisse bezeichnet. Um die Vielfalt der benötigten Bestandteile beherrschbar zu halten, werden die Elemente und die Verhaltensweisen hierarchisch definiert. Dabei erben Subelemente die Parameter und Ereignisse, wobei gewisse Parameter bei der Vererbung auch explizit mit Werten belegt werden können. Damit stehen Elemente und Verhaltensweisen auf unterschiedlichen Detaillierungsgraden zur Verfügung. Außerdem ergibt sich durch die hierarchische Struktur die Möglichkeit, mittels Top-Down Vorgehen die Definitionen gezielt zu erweitern. Diese Strukturierung des Alphabets lässt sich dementsprechend mit Hilfe von Klassendiagrammen darstellen, wie exemplarisch in Abb. 4.4 für die gewählte Strukturierung auf oberster Ebene gezeigt.

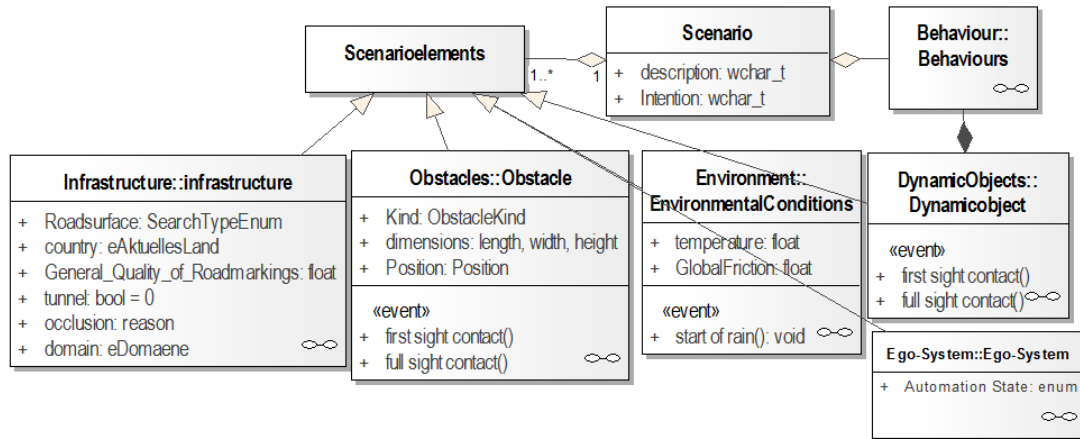


Abb. 4.4: Oberste Abstraktionsebene der definierten Beschreibungssprache

Elemente

Um eine intuitive Nutzung der HSDL zu ermöglichen, wurde bei der Strukturierung der Elemente *el* auf häufige Aufteilungen in der Literatur zurückgegriffen. Demnach werden die Elemente in die Bereiche Infrastruktur, Hindernisse, dynamische Objekte und Umweltbedingungen aufgeteilt. Unterhalb dieser Oberbegriffe spannen sich dann jeweils beliebig große Klassendiagramme auf. Zur Erstellung eines initialen Satzes an Elementen wurden vorhandene Szenarienkataloge analysiert und anschließend in mehreren Brainstorming-Gruppen mit Experten aus der Vorentwicklung automatisierter Fahrfunktionen erweitert und ergänzt.

Verhaltensweisen

Verhaltensweisen *be* können grundsätzlich frei definiert werden. Auf oberster Ebene wird bei den Verhaltensweisen von Verkehrsteilnehmern zwischen Fahrmanövern und sonstigem Verhalten getrennt. Um ein eindeutiges und umfassendes Set an Fahrmanövern zu definieren, werden die aus der Literatur bekannten Manöverlisten verglichen und in eine möglichst umfassende Liste überführt. Ausgehend von den Basismanövern von Nagel [70, 89] werden noch die Listen von Okuno [73], Tölle [71] und Dambier [72] verglichen. Die abgeleitete Manöverliste sowie die Referenzen auf die Quellenlisten sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Aus Literatur abgeleitetes Fahrmanöverset mit Zuordnung der relevanten Quellen

Nr.	Manövername	Dambier [72]	Okuno [73]	Nagel [70, 89]	Tölle [71]
1	Stand	M1			
2	Start	M4		1., 14.	MR1
3	Follow lane	M5	1.	2.	MR2
4	Approach object	M7		10.	MR3
5	Pass/Evade dynamic object	M9	6.	11.	MR4
6	Stop	M6		12.	MR3
7	Pass obstacle	M8		13.	MR4
8	Follow preceding vehicle longitudinal	M5	5.	15.	MR2
9	Follow path of preceding vehicle				
10	Cross intersection			3.	MR5
11	Lanechange or merge	M2	2.	4.	MR6
12	Turn	M3		5.	MR7

13	Slowdown to right road edge and stop		6.	MR3
14	Back up		7.	MR2
15	U-Turn		8.	MR8
16	Reverse direction		9.	MR8
17	Enter parking slot	M11	16.	MR9
18	Leave parking slot	M11	17.	MR9
19	Slow navigation	M10		
20	Exceptional maneuver	M12		

Parameter

Parameter pa konkretisieren die beschriebenen Elemente und Verhaltensweisen eines Szenarios. Gerade bei der Parametrierung wird der Zielkonflikt zwischen einfacher Beschreibbarkeit und Konsistenz offensichtlich. Es gibt unzählige Möglichkeiten, bestimmte Aspekte durch Parameter zu beschreiben. Einerseits kann die Genauigkeit von groben Diskretisierungen bis zu genauen Werteangaben reichen, andererseits können auch unterschiedliche Bezugssysteme gewählt werden, was noch deutlich schwieriger zu modellieren ist. Gerade bei der abstrakten Beschreibung von Szenarien sind häufig relative Angaben interessant, wie beispielsweise die Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Objekten.

Darüber hinaus stellt auch der angestrebte freie Abstraktionsgrad eine große Herausforderung für die Repräsentation der Parameter dar. Um eine möglichst große Flexibilität der Beschreibung zu ermöglichen, sind unterschiedliche Parametertypen, Bezugssysteme und definierbare zeitliche Gültigkeiten implementiert. Zur Beschreibung stehen die Parametertypen *boolean*, *enum*, *numeric* und *reference* zur Verfügung. Für den Parametertyp *enum* können beliebige Aufzählungsmengen definiert werden. Numerische Parameter lassen sich entweder als Wertebereich oder als zeitabhängiger Wertebereich definieren. Durch *reference*-Parameter können Verweise auf andere Elemente modelliert werden, beispielsweise dass sich die Verhaltensweise *Approach Object* auf ein bestimmtes Objekt bezieht.

Die unterschiedlichen Bezugssysteme beziehen sich auf numerische Parameter. Diese können entweder absolut oder relativ zu anderen Elementen definiert werden. Abschließend lässt sich für alle Parametertypen definieren, ob die gewählten Parameterdefinitionen nur einmal während eines beliebigen Zeitpunkts, während eines bestimmten Ereignisses, während mehrerer Ereignisse oder während des gesamten Szenarios gültig sind, um die zeitliche Veränderung von Szenarien abbilden zu können.

Für jedes Element und jede Verhaltensweise kann im Alphabet von HSDL eine Menge an möglichen Parametern definiert werden. Bei der Beschreibung eines Szenarios können aus dieser Menge die relevanten Parameter ausgewählt und mit Werten belegt werden. Die restlichen Parameter sind nach der Open World Assumption nicht näher definiert.

Zur Erstellung von sinnvollen Parametern hat sich hier die einfache Erweiterbarkeit des Alphabets bewährt. Durch die Modellierung zahlreicher Beispielszenarien aus unterschiedlichen Quellen konnte eine Vielzahl an relevanten Parametern implementiert werden. Möglicherweise entstehende Mehrdeutigkeiten könnten aufgrund der formalen Struktur explizit in den Suchalgorithmen berücksichtigt werden.

Ein entscheidender Punkt für eine Risikobewertung ist abschließend die Wahrscheinlichkeit, mit der diese Parameterwerte auftreten können. Gerade wenn Wertebereiche abgebildet werden, sind entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilungen notwendig. Diese Aspekte werden im Rahmen der Risikobewertung in Abschnitt 6.4.4 behandelt.

Ereignisse

Szenarien beinhalten nach ihrer Definition explizit eine zeitliche Ausdehnung. Um den zeitlichen Ablauf möglichst einfach beschreiben zu können, werden in der HSDL Ereignisse verwendet. Grundsätzlich besitzen jedes Element und jede Verhaltensweise neben den Parametern auch Ereignisse. Wie bei den Parametern können die als relevant erachteten Ereignisse bei der Szenarienbeschreibung mit Werten belegt werden. So kann beispielsweise bei der Verhaltensweise *lanechange or merge* in einem Szenario das Ereignis „Fahrstreifenmarkierung erreicht“ relevant sein, das End-Ereignis „Zielfahrstreifenmitte erreicht“ aber keine weitere Relevanz haben.

Um den Ablauf der relevanten Ereignisse zu modellieren, sind wieder unterschiedliche Beschreibungsmöglichkeiten in Form von Triggern implementiert. Die abstrakteste Beschreibung beinhaltet schlichtweg die Definition der Abfolge der Ereignisse ohne nähere zeitliche Angaben. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Ereignisse durch absolute Zeitbereiche fest zu definieren. Schließlich können die Ereignisse auch zeitlich relativ zu anderen Ereignissen definiert werden. Die aus Simulationsumgebungen bekannten Triggerbedingungen in Abhängigkeit von Parameterwerten sind in der Modellierung der Szenarienbeschreibung ebenfalls umgesetzt. Eine solche Beschreibung kann erst bei simulationsnahen Modellen automatisch ausgewertet werden. Bisher sind diese parameterbasierten Trigger noch nicht in der Ähnlichkeitssuche berücksichtigt und damit für die weitere Risikobewertung noch nicht nutzbar.

4.4 Ähnlichkeitssuche im Szenarienraum

Die automatische Verknüpfung der unabhängig modellierten Bestandteile Szenarien, Systemverhalten und Bewertungsmodelle ist der Schlüssel zur Beherrschung der Szenarienvielfalt und der effizienten Funktionsauslegung (Kap. 2.4 und 3.2). Die Grundlage dafür ist die formale Beschreibung jeweils mindestens einer Szenarienbedingung für jedes Systemverhaltensmodell und jedes Bewertungsmodell. Die Auswertung der Ähnlichkeit zwischen Szenarien und Szenarienbedingungen ermöglicht das Identifizieren und damit die automatische Verknüpfung der relevanten Szenarienbedingungen für jedes Szenario.

Für diese automatische Verknüpfung auf dem Szenarienraum muss eine Ähnlichkeitssuche entwickelt werden, sodass später hinzugefügte, beliebig komplexe Szenarien mit den entsprechenden Verhaltensweisen und Risiken automatisch verknüpft werden können (Abb. 3.3). Dadurch können auch Modellierungsfehler gefunden werden, falls bestimmte Elemente nicht richtig zugeordnet werden oder Lücken in der Verhaltensspezifikation vorhanden sind.

Allerdings besteht der Szenarienraum nicht, wie vereinfacht dargestellt, aus einer zweidimensionalen Ebene, sondern aus der Verknüpfung von Elementen, Parametern, Verhaltensweisen und Ereignissen. Aufgrund dieser klar definierten Struktur der Szenarienbeschreibungssprache kann auch die Suche mit einer klaren Struktur aufgebaut werden.

Bevor genauer auf den Aufbau der Suche eingegangen wird, soll zunächst die Problemstellung anhand der Anwendungsfälle der Suche detailliert werden. Für die Verknüpfung von Verhaltensmodellen mit Szenarien müssen die jeweils zu den Verhaltensmodellen gehörenden Szenarienbedingungen mit den vorhandenen Szenarien verglichen werden. Nur wenn ein Szenario alle relevanten Informationen beinhaltet, ist das Verhalten relevant. Neben dieser Suche nach direkt präziseren Szenarien ist es bei der Erstellung von Szenarien

notwendig, auch bestehende, ähnliche Szenarien zu finden, um Dopplungen zu vermeiden. Außerdem ermöglicht eine solche Ähnlichkeitssuche eine gewisse Fehlertoleranz im Vergleich zu einer strikten Bestandteilsuche.

Die Szenarienbeschreibung enthält jeweils nur die relevanten Informationen eines Szenarios. Deshalb werden nur Szenarien gesucht, die diese relevanten Informationen ebenfalls enthalten. Um die in Abschnitt 4.1.2 dargestellten Ähnlichkeitsmaße aus dem Stand der Wissenschaft verwenden zu können, wird das vorliegende Suchproblem schrittweise detailliert. Bergmann [83] definiert ein Ähnlichkeitsmaß in der Form $sim: \mathbf{ScSp} \times \mathbf{ScSp} \rightarrow [0,1]$. Im hier vorliegenden Kontext der Open World Assumption und durch die mit den Szenarien definierten Einschränkungen des Raums, beschreibt die Ähnlichkeit, in welchem Maß ein Szenario den gleichen Teil des \mathbf{ScSp} ebenfalls einschränkt. Darüber hinaus ist beim Vergleich noch relevant, wieviel konkreter dieses Szenario ist. Deshalb wird hier neben einem Ähnlichkeitsmaß zusätzlich ein Spezialisierungsmaß $spec: \mathbf{ScSp} \times \mathbf{ScSp} \rightarrow [0, \infty]$ eingeführt. Dieses Maß beschreibt, wie stark der Szenarienraum zusätzlich eingeschränkt bzw. spezialisiert ist. Das Maß wird definiert als das Verhältnis der Mächtigkeiten des Szenarienraums des gesuchten Szenarios zu dem des gefundenen Szenarios. Dabei sind das gesuchte Szenario sc_s und ein potenziell gefundenes Szenario sc_f Teil des oben definierten Szenarienraums $sc \subseteq \mathbf{ScSp}$. Damit ergibt sich für das benötigte Ähnlichkeitsmaß:

$$sim_{sc}(sc_f, sc_s) = \begin{cases} 1 & : sc_f \subseteq sc_s \\ [0,1[& : sonst \end{cases} \quad (4.3)$$

Dabei werden Szenarien, die mindestens dieselben Aspekte enthalten, durch $sc_f \subseteq sc_s$ beschrieben, weil sie eine Teilmenge des gesuchten Szenarios darstellen.

$$spe(sc_f, sc_s) = \begin{cases} > 1 & : |sc_f| < |sc_s| \\ 1 & : |sc_f| = |sc_s| \\ [0,1[& : sonst \end{cases} \quad (4.4)$$

Das Spezialisierungsmaß nimmt Werte über Eins an, wenn die Mächtigkeit des beschriebenen Szenarienraums $|sc_f|$ kleiner als der des Suchszenarios ist $|sc_f| < |sc_s|$. Detailliertere Ausführungen zu den mathematischen Operationen auf dem Szenarienraum sind im Anhang A.2 zu finden.

Gemäß dem in Abschnitt 4.1.2 zitierten Lokal-Global-Ansatz werden zuerst die Ähnlichkeiten von einzelnen Bestandteilen der Szenarien betrachtet. Diese sind die Ähnlichkeiten der Elemente (sim_{EL}), der jeweils konkretisierten Parameter (sim_{Pa}), der zugewiesenen Verhaltensweisen (sim_{Be}) inkl. der jeweils konkretisierten Verhaltensparameter und schließlich der definierten Ereignisse (sim_{Ev}) und deren Ereignisreihenfolge. Damit lässt sich die Ähnlichkeit zwischen Szenarien als gewichtete Summe aus den Einzelähnlichkeiten ermitteln:

$$sim_{sc}(sc_f, sc_s) = w_{EL}sim_{EL} + w_{Pa}sim_{Pa} + w_{Be}sim_{Be} + w_{Ev}sim_{Ev} \quad (4.5)$$

Allerdings gibt es durch die Möglichkeiten der zeitabhängigen und relativen Parameterdefinition Abhängigkeiten zwischen diesen Bestandteilen. Vor allem bei komplexen Zusammenhängen können diese möglicherweise nur im Gesamtkontext sinnvoll verglichen werden. Der Aufwand für die Berechnung der dafür nötigen Ähnlichkeiten von allen möglichen Element-, Verhaltens-, Parameter- und Eventkombinationen zwischen zwei Szenarien würde allerdings schnell explodieren und bei komplexeren Szenarien das effiziente Durchsuchen der

vorhandenen Szenarien unmöglich machen. Deshalb wird hier ein stufenweises Suchverfahren eingesetzt, bei dem entlang der logischen Struktur der Szenarienbeschreibung der Suchraum sukzessive eingegrenzt werden kann. Da der Aufwand pro Szenarienvergleich mit jeder Stufe größer wird, erscheint die sukzessive Eingrenzung der jeweils zu betrachtenden Szenarien sinnvoll. Auf jeder Teilstufe wird ein Ähnlichkeitsmaß zwischen dem gesuchten Szenario und dem bewerteten Szenario gebildet. Abhängig von einem wählbaren Grenzwert wird dieses Szenario dann ausgeschlossen oder weiter im Suchraum behalten. Dieses Vorgehen ist schematisch in Abb. 4.5 dargestellt. Eine geeignete Wahl der Grenzwerte reduziert damit die notwendigen Ähnlichkeitsberechnungen deutlich. Für die bei diesem Vorgehen anfangs noch nicht auflösbaren Abhängigkeiten und Verweise findet zuerst nur eine grobe Plausibilisierung und vorläufige Ähnlichkeitsbewertung statt. Diese werden dann abschließend anhand aller vorliegenden Ähnlichkeiten ausgewertet.

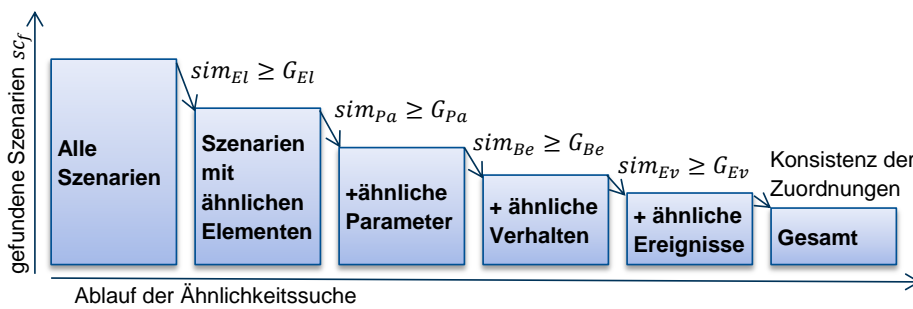


Abb. 4.5: Schematische Darstellung der schrittweisen Eingrenzung des Suchraums bei der Suche von ähnlichen Szenarien.

4.4.1 Ähnlichkeit der Elemente

Im ersten Schritt wird überprüft, ob die gesuchten Elemente von sc_s in sc_f enthalten sind. Da Szenarien grundsätzlich eine beliebige Anzahl von Elementen besitzen können, handelt es sich laut Bergmann [83, S. 146] um ein Multi-Value Attribut. In diesem Fall soll die Abbildung surjektiv sein, d.h. dass jedes gesuchte Element zu mindestens einem gefundenen Element ähnlich ist. Als Ähnlichkeit auf Elementebene wird nur geprüft, ob das gefundene Element identisch zu dem gesuchten Element oder einem dessen Kind-Elemente ist:

$$sim_{el}(el_{f,i}, el_{s,j}) = \begin{cases} 1 : el_{f,i} = el_{s,j} \vee el_{f,i} \in childs(el_{s,j}) \\ 0 : sonst \end{cases} \quad (4.6)$$

Dabei ist $el_{f,i} \in sc_f, i \in \{1, \dots, m\}$ eines von m Elementen des gefundenen Szenarios sc_f und $el_{s,j} \in sc_s, j \in \{1, \dots, n\}$ analog eines von n Elementen des gesuchten Szenarios sc_s .

Aufgrund der beliebigen Zuordnung zwischen den Elementen, ergibt sich eine $m \times n$ Matrix mit Ähnlichkeitswerten.

$$sim(el_f, el_s) = \begin{pmatrix} sim_{el}(el_{f,1}, el_{s,1}) & \cdots & sim_{el}(el_{f,1}, el_{s,n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ sim_{el}(el_{f,m}, el_{s,1}) & \cdots & sim_{el}(el_{f,m}, el_{s,n}) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Im nächsten Schritt muss sichergestellt werden, dass gefundene Elemente nicht mehrfach zum Erfüllen der Ähnlichkeitsanforderung verwendet werden, also beispielsweise zwei Elemente zu drei gesuchten Elementen zugeordnet werden. Die Ähnlichkeit auf Elementebene ergibt sich dann durch den Mittelwert der maximalen Ähnlichkeit für jedes Element:

$$sim_{El}(sc_f, sc_s) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \max \{sim_{el}(el_{f,i}, el_{s,j}) \mid i \in \{1, \dots, m\}\} \quad (4.8)$$

Um die zusätzliche Spezialisierung des Szenarios abzubilden, wird als Spezialisierungsmaß der Quotient der Anzahlen der definierten Elemente verwendet. Auf eine unterschiedliche Gewichtung des Spezialisierungseinflusses der einzelnen Elemente wird demnach verzichtet.

$$spe_{El}(sc_f, sc_s) = \frac{m}{n} \quad (4.9)$$

4.4.2 Ähnlichkeit der Parameterbereiche

Bei der Ähnlichkeitsbestimmung der Parameter bestehen die Herausforderungen, dass für Elemente einerseits ein beliebiges Set ihrer Parameter definiert werden kann und andererseits bei mehreren gleichen Elementen in den Szenarien die Zuordnung zwischen den Elementen und den Parametersets beliebig sein kann. Für die Ähnlichkeitsbestimmung muss demnach die Kombination mit der höchsten Ähnlichkeit gefunden werden.

Die Ähnlichkeit von Parametersets ergibt sich unter der Bedingung, dass alle Parameter $pa_{s,k}$ des gesuchten Parametersets $pSet_s$ im Vergleichsset $pSet_f$ enthalten sind, aus dem Minimum der Ähnlichkeit der Parameterwerte

$$sim_{pSet}(pSet_{f,i}, pSet_{s,j}) = \begin{cases} \min \{sim_{pa}(pa_{f,k}, pa_{s,k})\} : k \in pSet_s \\ 0 : sonst \end{cases} \quad (4.10)$$

Wie in Abschnitt 4.3.2 dargestellt, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, Parameterbereiche zu definieren, für die dementsprechend auch unterschiedliche Ähnlichkeitsmaße sim_{pa} definiert werden müssen. Bei numerischen Parametern wird das Ähnlichkeitsmaß durch den Vergleich der Einschränkungen des Parameterraums definiert. Als Ähnlichkeitsmaß wird der normierte Schnittbereich zwischen dem im Bereich der Einschränkung erlaubten Parameterbereich des gesuchten Parameters $A(pa_{s,j})$ und dem Parameterbereich des gefundenen Parameters $A(pa_{f,i})$ definiert (Abb. 4.6).

$$sim_{pa,numeric}(pa_{f,i}, pa_{s,j}) = \frac{|A(pa_{f,i}) \cap A(pa_{s,j})|}{|A(pa_{f,i})|} \quad (4.11)$$

Die jeweiligen Bereiche hängen einerseits von der Art der Parameterdefinition und andererseits von deren zeitlichen Gültigkeit ab.

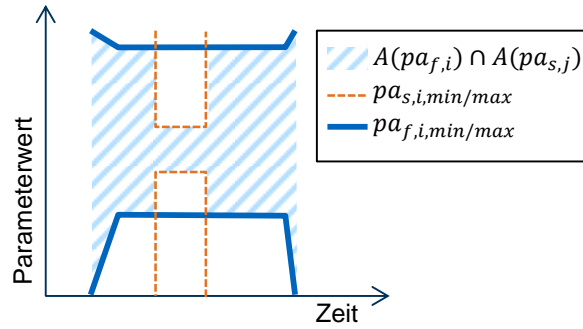


Abb. 4.6: Veranschaulichung des Vergleichs unterschiedlicher Parametereinschränkungen

Die Spezialisierung entspricht dem Größenverhältnis aus ursprünglich erlaubtem Bereich und gefundenem Bereich:

$$spe_{pa,numeric}(pa_{f,i}, pa_{s,j}) = \frac{|A(pa_{s,j})|}{|A(pa_{f,i})|} \quad (4.12)$$

Die Einführung von relativen Definitionen numerischer Parameter ist für die Flexibilität der Szenarienbeschreibung vorteilhaft, erfordert bei der Ähnlichkeitssuche allerdings zusätzlichen Aufwand. Im einfachsten Fall verweisen relative Parameter auf ein ähnliches Element, dann wird neben den Parameterwerten nur die Ähnlichkeit des Referenzelements überprüft. Referenzieren Parameter aber auf unterschiedliche Elemente oder sollen absolute und relative Parameter verglichen werden, müssen die Werte in ein einheitliches Bezugssystem transformiert werden. Das ist jedoch nur möglich, wenn alle notwendigen Referenzwerte in den beteiligten Szenarien definiert sind.

Bei Aufzählungsparametern ist jedes Aufzählungselement ein Freiheitsgrad des Parameterraums. Demnach wird das Ähnlichkeitsmaß reduziert, wenn der gefundene Parameter zusätzliche Freiheitsgrade enthält. Mit der Mächtigkeit der gewählten Aufzählungsparameter $|pa|$ lässt sich das Ähnlichkeitsmaß folgendermaßen definieren:

$$sim_{pa,enum}(pa_{f,i}, pa_{s,j}) = 1 - \frac{|pa_{f,i} \setminus pa_{s,j}|}{|pa_{f,i}|} \quad (4.13)$$

Als Spezialisierungsmaß wird das Verhältnis von ursprünglichen zu reduzierten Freiheitsgraden verwendet $spe_{pa,enum} = \frac{|pa_{s,j}|}{|pa_{f,i}|}$.

Boolesche Parameter können trivialerweise nur genau übereinstimmen oder sich genau widersprechen. Die Ähnlichkeit von Referenzparametern ist dagegen deutlich schwieriger zu bestimmen. Diese hängt von der Ähnlichkeit der referenzierten Elemente ab, die aufgrund des schrittweisen Vorgehens aber potenziell noch nicht abschließend bestimmt ist. Um dennoch den Suchraum weiter einschränken zu können, wird wie bei relativen numerischen Parametern überprüft, ob die referenzierten Elemente auf Basis der bisherigen Erkenntnisse ausreichend ähnlich sind:

$$sim_{pa,ref}(pa_{f,i}, pa_{s,j}) = \begin{cases} 1 & : RefEl(pa_{f,i}) \approx RefEl(pa_{s,j}) \\ 0 & : sonst \end{cases} \quad (4.14)$$

Die genauen Ähnlichkeitswerte solcher vorläufigen Einstufungen müssen dann am Ende des Vergleichvorgangs noch aktualisiert werden.

Darüber hinaus ist auch die zeitliche Gültigkeit der Parameterwerte für deren Ähnlichkeit entscheidend. Nur wenn die zeitliche Gültigkeit überlappt, können Parametereinschränkungen ähnlich sein. Wie in Abb. 4.6 für numerische Parameter dargestellt, ist die Kombination aus zeitlicher Gültigkeit und den jeweiligen Parameterwerten für die Ähnlichkeitswerte relevant. Dies gilt analog für die anderen Parametertypen. Ist die zeitliche Abhängigkeit allerdings nicht global, sondern Eventbasiert definiert, müssen hier ebenfalls vorläufige Bewertungen nur auf Basis der Parameterwerte getroffen werden, die nach dem Eventvergleich der Szenarien um die Bewertung der zeitlichen Überlappung detailliert werden können.

Aus den einzelnen Ähnlichkeitsmaßen der Parameter kann mit Gl. (4.10) die Ähnlichkeiten aller Parametersetkombinationen ermittelt werden. Durch Summation der Werte der ähnlichsten Kombination und Normierung mit der Anzahl der gesuchten Parametersets kann die Parameterähnlichkeit auf Szenarienebene sim_{pa} berechnet werden. Das zugehörige Spezialisierungsmaß wird als Produkt aller beteiligten Parameterspezialisierungen gebildet.

4.4.3 Ähnlichkeit der Verhaltensweisen

Bei der Ähnlichkeit von Szenarien bezüglich der definierten Verhaltensweisen müssen zwei Aspekte bewertet werden. Einerseits müssen dieselben oder zumindest hierarchisch ähnliche Verhaltensweisen definiert sein, analog zum Vergleich der Elemente. Andererseits ist aber auch die Zuordnung der Verhaltensweisen zu den Elementen entscheidend. Da für jedes Element beliebig viele Verhaltensweisen definiert werden können, müssen jeweils diese Verhaltenssets verglichen werden. Die Ähnlichkeit dieser Verhaltenssets $bSet$ kann analog zur Elementähnlichkeit wie in Gl. (4.8) bestimmt werden, allerdings mit einer komplexeren Ähnlichkeitsberechnung zwischen den Verhaltensweisen:

$$sim_{bSet}(bSet_f, bSet_s) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \max \{ sim_b(b_{f,i}, b_{s,j}) \mid i \in \{1, \dots, m\} \} \quad (4.15)$$

Dabei ist $bSet_f$ das Set aller Verhaltensweisen eines Elementes des gefundenen Szenarios und $b_{f,i}$ entsprechend eine von m Verhaltensweisen dieses Elements. Diese Ähnlichkeit der Verhaltensweisen muss nur zwischen grundsätzlich ähnlichen Elementen bestimmt werden, stellt neben der Ähnlichkeit der Parameter aber einen weiteren wichtigen Bestandteil der Ähnlichkeit von Elementen dar.

Aufgrund der gleichen Struktur von Verhaltensweisen und Elementen in der HSDL kann die Ähnlichkeit von Verhaltensweisen und deren Verhaltensparameter sim_{Be} analog zur Ähnlichkeit von Elementen und deren Parameter bestimmt werden, wie in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 beschrieben. Konkret wird die Ähnlichkeit der Verhaltensweisen analog zu Gl. (4.6) bestimmt und die Ähnlichkeit deren Parameter wie in Gl. (4.10) - (4.14).

4.4.4 Ähnlichkeit des zeitlichen Szenarienablaufs

Zur Ermittlung der Ähnlichkeit des zeitlichen Ablaufs von zwei definierten Szenarien gibt es zwei relevante Aspekte, einerseits die gewählten Ereignisse und andererseits die definierte Abfolge dieser Ereignisse. Die Ereignisse sind zwar fest einzelnen Elementen oder Verhaltensweisen zugeordnet, aber ihre Definition ist nicht so eindeutig wie die der Parameter. So können beispielsweise für eine Verhaltensweise zahlreiche Ereignisse relevant sein, die effektiv nur kurz hintereinander stattfinden. Deshalb ist für Ereignisse einer Verhaltensweise

eine eigene Ähnlichkeitsdefinition f_k , die die Ähnlichkeit zwischen den Ereignissen der Verhaltensweise k beschreibt, sinnvoll

$$sim_{ev,ia}(ev_{f,i}, ev_{s,j}) = \begin{cases} 1 : id(ev_{f,i}) = id(ev_{s,j}) \\ f_k(ev_{f,i}, ev_{s,j}) : \exists be_k | ev_{f,i}, ev_{s,j} \in be_k \\ 0 : sonst \end{cases} \quad (4.16)$$

Die Ähnlichkeitsfunktion wird hier vereinfachend als $f_k(ev_{f,i}, ev_{s,j}) = 1 - |\sigma(ev_{f,i}) - \sigma(ev_{s,j})|$ gewählt, wobei die Ähnlichkeitswerte σ den einzelnen Ereignissen fest zugeordnet sind. Diese müssen demnach für alle potenziell ähnlichen Ereignisse entsprechend gewählt werden. Auf Basis dieser Ähnlichkeit können alle Zuordnungen zwischen Ereignissen gebildet werden, die eine bestimmte Mindestähnlichkeit aufweisen. Dabei ist die Zuordnung nur für Ereignisse notwendig, die mit einem ähnlichen Element oder einer ähnlichen Verhaltensweise verknüpft sind.

Darauf aufbauend kann die Ähnlichkeit der Abfolge bestimmt werden. Dafür wird für jedes der Szenarien die Abfolge der Ereignisse mit Hilfe einer überlappenden Rangfolge beschrieben. Durch die flexible Definition der zeitlichen Abfolge ist das Bilden dieser Rangfolge nicht ohne Unsicherheiten möglich. Gegebenenfalls werden für gewisse Triggertypen notwendige Annahmen getroffen. Dabei werden klar definierte, relative zeitliche Abfolgen explizit durch einen Rangunterschied angezeigt. Überlappende Ereignisse werden demselben Rang und nicht überlappende Ereignisse unterschiedlichen Rängen zugeordnet. Das bedeutet, dass sowohl mehrere Ereignisse in einem Rang enthalten sein können als auch ein Ereignis in mehreren zusammenhängenden Rängen gelistet sein kann, wie exemplarisch in Abb. 4.7 dargestellt.

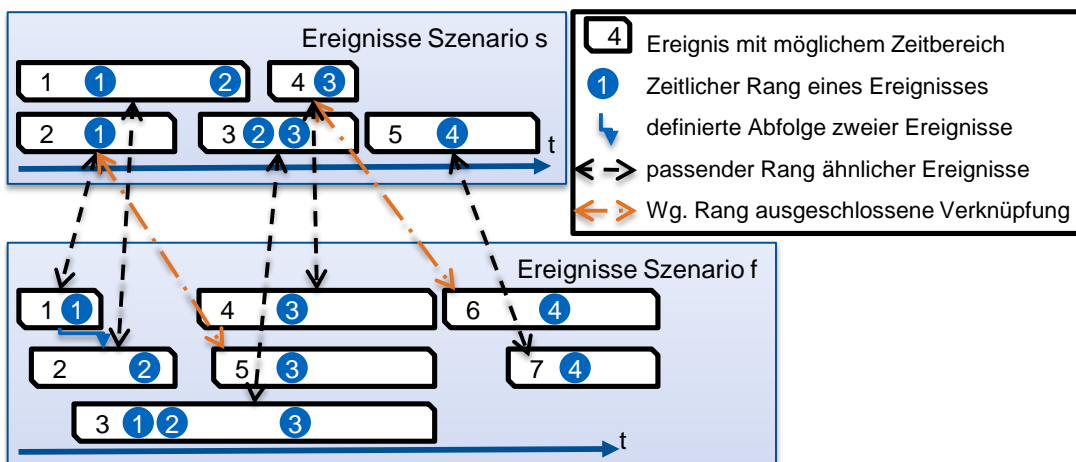


Abb. 4.7: Schematische Darstellung der zeitlichen Rangfolge der Ereignisse zweier Szenarien, der möglichen Verknüpfung aufgrund von Ereignisähnlichkeiten sowie einer verbleibenden, möglichen Zuordnung auf Basis der gesuchten Rangfolge

Um die Ähnlichkeit von Abfolgen bestimmen zu können, wird entlang der Ränge der gesuchten Abfolge geprüft, ob bei den zugeordneten Ereignissen dieselbe Rangfolge abgebildet werden kann. Dabei können auch mehrere unterschiedliche Zuordnungen entstehen, die als einzelne Hypothesen hinterlegt werden. Die Ähnlichkeit der Abfolge einer Zuordnungs-Hypothese $sim_{rank,hyp}$ ergibt sich dann als Mittelwert aus allen passenden Ereignis-Ereignis-Zuordnungen.

$$sim_{rank,hyp}(sc_f, sc_s) = \frac{1}{n_{ev,s}} \sum_{j=1}^{n_{ev,s}} sim_{ev,id}(ev_{f,i}, ev_{s,j}) , i: ev_{f,i} \leftrightarrow ev_{s,j} \quad (4.17)$$

Die Ähnlichkeit auf Ereignisbasis entspricht abschließend der Ähnlichkeit der besten Zuordnungshypothese $sim_{Ev}(sc_f, sc_s) = \max_{hyp}(sim_{rank,hyp}(sc_f, sc_s))$.

4.5 Bewertung der Beschreibungssprache

Zur Bewertung der entwickelten Beschreibungssprache wird die Erfüllung der gestellten Anforderungen aus Abschnitt 4.2 anhand von umgesetzten Beispielen argumentiert. Dabei wird auf die Umsetzung der Beschreibung, die verwendeten Beispiele sowie exemplarische Ergebnisse eingegangen, bevor die Anforderungserfüllung diskutiert wird.

4.5.1 Umsetzung der Szenarienbeschreibung

Zur Entwicklung und Evaluierung des Konzepts wurde die vorliegende Szenarienbeschreibung sowie die gesamte Risikobewertungsmethodik inkl. Funktionsmodellierung prototypisch in einer PostgreSQL Datenbank und einem Matlab Frontend implementiert. Sowohl die formale Struktur der HSDL als auch die Erweiterbarkeit sowie die Verwaltung zahlreicher Szenarien können durch eine relationale Datenbank abgebildet werden. Aufgrund der Komplexität der benötigten Suchalgorithmen wurden diese nicht direkt in PostgreSQL, sondern in Matlab implementiert. Zur besseren Bedienbarkeit der Szenariendatenbank dient eine Matlab-Benutzeroberfläche zum Bearbeiten und Suchen von Szenarien. Eine möglicherweise effizientere Umsetzung durch alternative Datenbanksysteme wurde in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

4.5.2 Modellierete Szenarien

Für die Entwicklung und Bewertung der Szenarienbeschreibung wurden Beispielszenarien aus unterschiedlichen Quellen herangezogen wie interne Szenarienkataloge von Gefahren- und Risikobewertungen und Testspezifikationen, plakative Beispielszenarien aus Diskussionen in der Entwicklung bis hin zu Beispielen aus der Literatur und Messdaten. Durch die Entwicklung der Sprache anhand der internen Kataloge konnte bereits eine große Bandbreite an möglichen Szenarien modelliert und getestet werden. Zur neutralen Bewertung wird die entwickelte Sprache an einem Beispiel erläutert und anschließend auf veröffentlichte Beispiele und eine Messfahrt angewendet.

Die meisten Szenarien in der Entwicklung dienen zur Darstellung einer bestimmten Konstellation während eines kurzen Zeitverlaufs, ähnlich dem in Abb. 4.3 dargestellten Beispielszenario. Die relevanten Informationen können dementsprechend kompakt durch die HSDL modelliert werden. Um die Funktionsweise der entwickelten Beschreibungssprache im Detail nachvollziehen zu können, werden für einige Beispiele die in der Datenbank verknüpften Informationen als Export dargestellt. In Tabelle 4.2 sind dementsprechend die Informationen aus Abb. 4.3 abgebildet, wobei durch Einrückung jeweils die Zugehörigkeit der Verhaltensweisen zu den Elementen repräsentiert wird. In Klammern sind jeweils die für die Referenzen notwendigen Identifikatoren der Elemente und der Verhaltensweisen beschrieben. Parameter

werden durch Punkte angeführt und die Reihenfolge der Ereignisse ist am Ende der Beschreibung hier vereinfacht als einfache Rangfolge dargestellt.

Tabelle 4.2: Abstrahierte formale Beschreibung des Beispiels aus Abb. 4.3

Formale Beschreibung mittels HSDL

```
Sc63+Vehicle(3)
  +Stop(b2).Acceleration_x=[-4,-1]
+Vehicle(2).Kind={passenger car}
  +LaneChangeMerge(b1).CutInRearDistance=[30,40]
                        .CutInRearRelativeVelocity=[-15,-5]
                        .CutInInFrontOf=(1)
                        .SheerOutBehind=(3)
+Vehicle(1).Kind={passenger car}
  .Velocity_x(0)=[16.6667,36.1111]
  .IsEgo=1
  +FollowLane(b3)
  +Route(4).NumberOfLanes_EgoDirection(0)=[2,Inf]
2:BeginnOfDeceleration(3,b2)
3:StartCrossingOfLaneMarking(2,b1)
```

Zum Testen der Anwendbarkeit wurden auch Beispiele aus der Literatur modelliert, wie beispielsweise die beiden Kreuzungsszenarien aus [90]. In der Quelle ist kein Zeitablauf abgebildet; deshalb wurde ein denkbarer Ablauf im Szenario modelliert. Da Kreuzungen auf Autobahnen nicht vorkommen, fehlten detaillierte Parameter sowie ein Konzept, um Kreuzungen in der Sprache abzubilden. Für das Beispiel wurde lediglich eine einfache Kodierung der Kreuzungsinfrastruktur entwickelt und in die HSDL integriert. Durch detaillierte Analyse der entsprechenden Auslegungsrichtlinien und der häufigsten Anwendungsbeispiele für Kreuzungsszenarien kann hier eine verbesserte Modellierung erzielt werden. In Summe kann das Szenario, wie im Anhang A.3 aufgelistet, durch 8 Elemente, 31 Parameter, 4 Verhaltensweisen, 13 Verhaltensparameter und 4 Ereignisse modelliert werden.

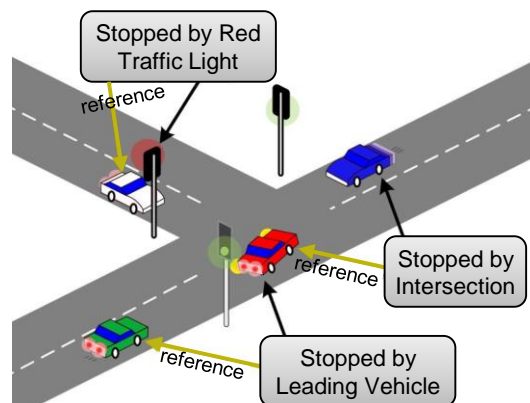


Abb. 4.8: Beispiel einer schematischen Szenariendarstellung aus [90, S. 1342]

Zur neutralen Bewertung der Methodik wird diese auf ein anderes Projekt angewendet. Aufgrund der öffentlichen Zugänglichkeit wird deshalb in der Evaluierung auf die veröffentlichte Gefahren- und Risikoanalyse (G&R) in [91] zurückgegriffen. In diesem Abschnitt wird nur auf die Szenarienmodellierung eingegangen. Wie für G&R üblich, wird das gefährliche Szenario jeweils nur grob umrissen und zusätzlich noch mit dem Fehlverhalten sowie den Auswirkungen überlagert. Für die Risikobewertung ist nur das grobe Szenario notwendig. Zur Bewertung der Mächtigkeit der Szenarienbeschreibung werden aber zusätzlich spezialisierte Szenarien modelliert, die auch das in der G&R beschriebene Systemverhalten sowie die Konsequenzen

beinhalten. Von den dabei modellierten 30 Szenarien sind einige ebenfalls im Anhang A.3 abgebildet, um einen transparenten Einblick in die Modellierungen zu gewährleisten. Bei der Nachbildung dieser Szenarien wurden sinnvolle Erweiterungen des Alphabets durch Hinzufügen eines *Anti-Lock-Parameters* zur Verhaltensweise *Stop* sowie die zur abstrakten Fehlerbeschreibung nutzbare Verhaltensweise *UncontrolledDueToLockingTires* identifiziert. Bei der Modellierung der Literaturbeispiele wurde einerseits der Vorteil der einfachen Erweiterbarkeit der Szenarienbeschreibung ersichtlich und andererseits die Notwendigkeit eines sinnvollen Umgangs mit der Szenarienvielfalt, weil selbst in dem stark eingeschränkten Anwendungsbereich des aFAS [91] bereits so viele Szenarien generiert werden.

Neben der Abbildung von abstrakten Szenarien sollen auch konkrete Szenarien modelliert werden können. Zur Veranschaulichung wird der Ausschnitt einer durchgeführten Messfahrt als Szenario modelliert. Der Ablauf des Szenarios ist in Abb. 4.9 a) durch eine Abfolge von Frontkamerabildern dargestellt. Die entwickelte Beschreibungssprache ermöglicht nun, das Szenario schrittweise abzubilden. In Tabelle 4.3 ist beispielsweise die Modellierung der vier Fahrzeuge und deren Verhalten aufgelistet. Offensichtlich enthält ein reales Szenario nahezu unendlich viele, detailliertere Informationen. Je nach Relevanz kann diese Szenarienbeschreibung demnach detailliert werden. So können aus den aufgezeichneten Messdaten abstrahierte Parameter zur Beschreibung gewonnen werden, wie in Abb. 4.9 b) für die Einschervorgänge des Taxis angedeutet, oder direkt die dargestellten Zeitverläufe hinzugefügt werden. Diese Detaillierung ist aufgrund der Erweiterbarkeit des Alphabets für alle in den Messdaten enthaltenen Informationen möglich.

Tabelle 4.3: Abstrahierte formale Beschreibung einiger wesentlicher Aspekte des Messdatenszenarios inkl. der Eventabfolge

Formale Beschreibung mittels HSDL

```
Sc422+EgoVehicle(1).IsEgo=1
  +FollowObjectLong(b3).TargetObject=(3)
  +FollowObjectLong(b8).TargetObject=(2)
  +FollowObjectLong(b9).TargetObject=(3)
  +FollowLane(b10)
+Vehicle(4).Lane(1)=[-1,-1]
  +FollowLane(b5)
+Vehicle(3).Lane(1)=[0,0]
  +FollowLane(b4)
  +Stop(b6)
+Vehicle(2)
  +LaneChangeMerge(b1).CutInInFrontOf=(1)
                        .ChangeToThe={right}
                        .CutInBehind=(3)
  +LaneChangeMerge(b2).CutInInFrontOf=(4)
                        .ChangeToThe={right}
                        .SheerOutBehind=(3)
  +PassOvertakeDynamicObject(b7).SideOfOvertakenObject={right}
                                .TargetObject=(4)

1:StartOfManeuver(1,b3)
2:StartCrossingOfLaneMarking(2,b1)
3:StartOfManeuver(1,b8)
4:ReachHightOfVehicle(2,b7)
5:LeaveHightOfVehicle(2,b7)
6:StartCrossingOfLaneMarking(2,b2)
7:EndCrossingOfLaneMarking(2,b2)
8:StartOfManeuver(1,b9)
9:BeginnOfDeceleration(3,b6)
```

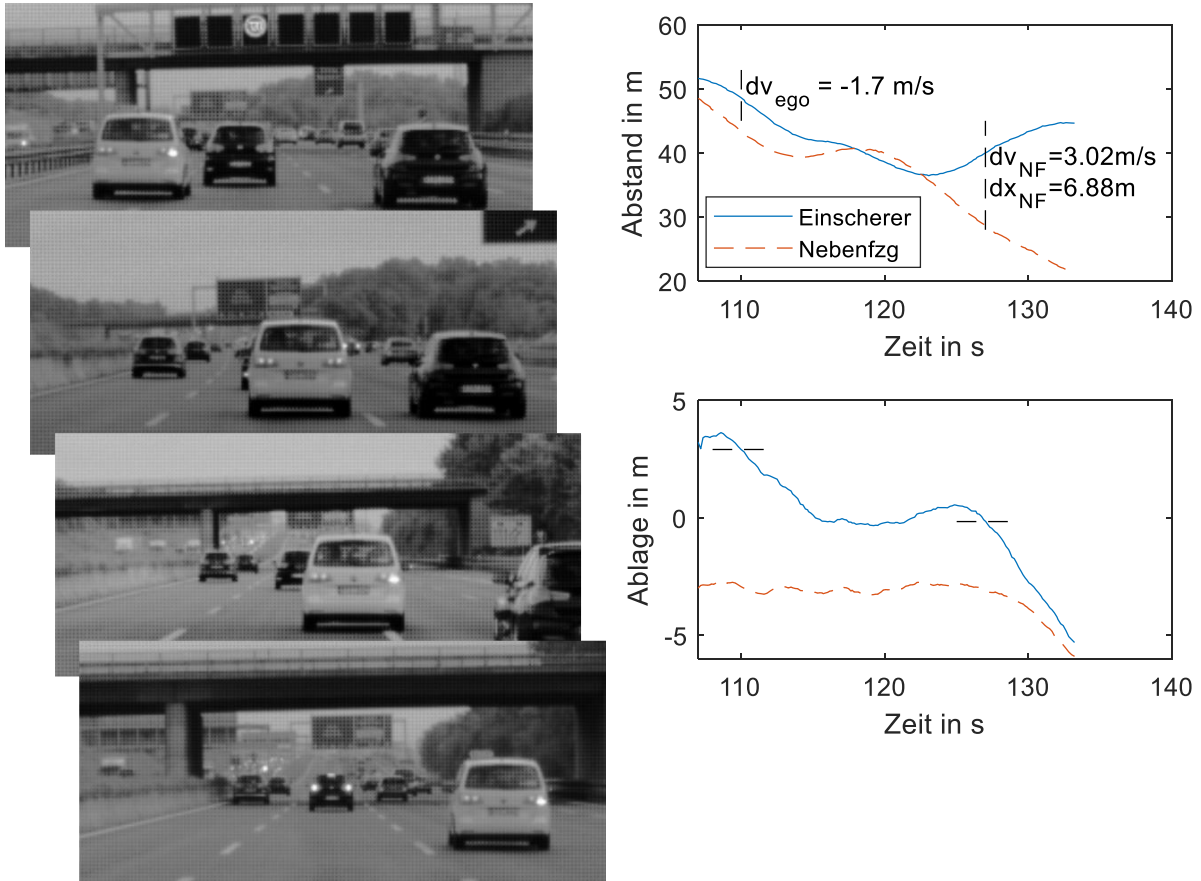


Abb. 4.9: a) Visualisierung des exemplarischen Szenarios (Tabelle 4.3) durch die aufgezeichneten, aufeinanderfolgenden Kamerabilder; b) Darstellung der modellierten Zeitverläufe sowie abstrahierten Parameter zur detaillierten Beschreibung der Fahrstreifenwechsel im Szenario

4.5.3 Ergebnisse der Ähnlichkeitssuche

Die hier entwickelte Ähnlichkeitssuche stellt einen komplexen Vergleich von Graphenstrukturen dar. Die Hauptanforderung ist dabei ähnliche und überlappende Szenarien zu finden. Aufgrund der Open World Assumption des Szenarienraums wurde explizit ein Ähnlichkeitsmaß entwickelt, das bewertet, ob ein gefundenes Szenario in einem gesuchten Szenario enthalten ist. D.h. ob der gefundene, beschriebene Szenarienraum eine Teilmenge des gesuchten Szenarienraums ist. Daraus folgt direkt, dass das entwickelte Ähnlichkeitsmaß nicht symmetrisch ist, jedoch die Reflexivitätsbedingung $sim(x, x) = 1, \forall x$ erfüllt werden muss. Zur Überprüfung wurden für alle im Rahmen der Arbeit exemplarisch erstellten 105 Szenarien (z.B. A.3) und die durch Ego-Verhaltensergänzung (Abschnitt 5.4) modifizierten 451 Szenarien jeweils die Ähnlichkeitssuche durchgeführt. In Abb. 4.10 sind die resultierenden Ähnlichkeitswerte sim_{sc} links und die resultierenden Spezialisierungswerte spe_{sc} rechts der Zuordnungsmatrizen zwischen gesuchten Szenarien und gefundenen Szenarien als Graustufen visualisiert.

Die umgesetzte Ähnlichkeitssuche erfüllt die Reflexivität für alle modellierten Szenarien, was sich durch die Diagonale mit Einsen in der Ähnlichkeitsabbildung widerspiegelt. Wie erwartet, ist die Ähnlichkeitssuche nicht symmetrisch, was an der unsymmetrischen Matrix zu erkennen ist.

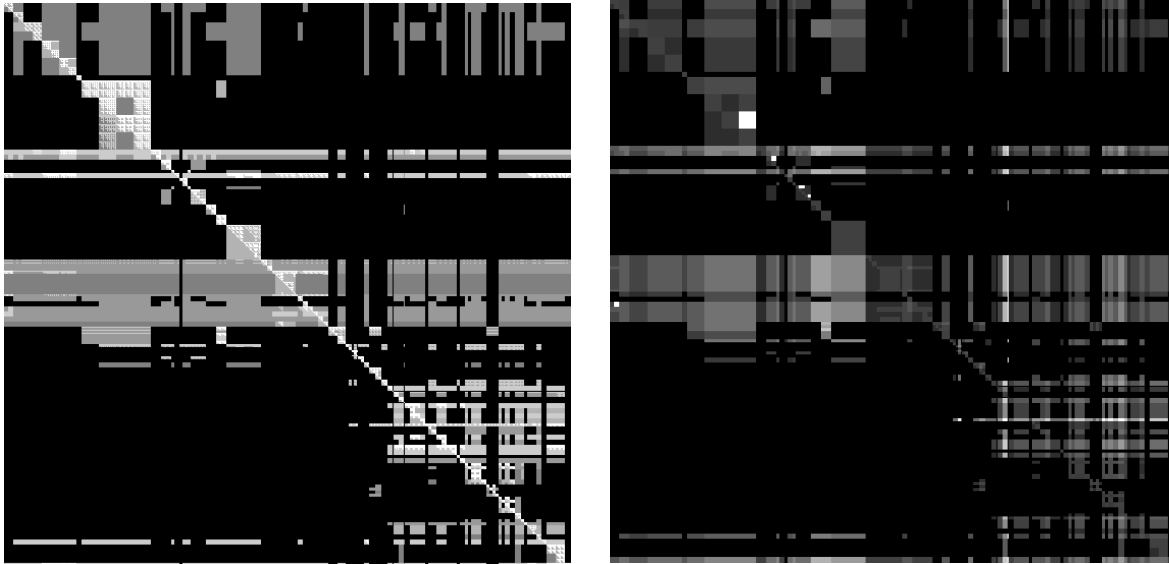


Abb. 4.10: Darstellung aller Ähnlichkeitswerte (links, schwarz=0, weiß=1) und aller Spezialisierungswerte (rechts, normiert auf den Bereich schwarz=0 bis weiß =4) zwischen allen modellierten Szenarien

Zur Überprüfung der korrekten Ermittlung der Ähnlichkeitswerte wurden darüber hinaus einige generierte Ähnlichkeitswerte systematisch auf Plausibilität überprüft. So müssen alle Szenarien zu ihren Szenarienmodifikationen einen Ähnlichkeitswert von eins aufweisen, weil diese ja nur um zusätzliche Ego-Verhaltensweisen ergänzt sind. Dasselbe Prinzip wurde auch auf die Szenarienbedingungen der Systemverhaltensweisen und Risikomodelle sowie deren Spezialisierungen angewendet. Dabei wurde jeweils überprüft, ob Szenarien, die zu einer Spezialisierung zugeordnet wurden, zur abstrakteren Bedingung einen mindestens gleich großen Ähnlichkeitswert aufweisen.

4.5.4 Diskussion der Szenarienbeschreibung

Anhand der umgesetzten Beispiele wird im Folgenden die Erfüllung der gestellten Anforderungen diskutiert. Aufgrund der Anforderungen A_S1 und A_S2 muss die HSDL abstrakte und konkretere Szenarienmodellierungen ermöglichen. Dabei sollen Szenarien aus theoretischen Überlegungen, Simulationen, realen Daten oder Erfahrungen stammen (A_S6). Zur Überprüfung dieser Anforderungen wurden neben den im Projekt verwendeten umfangreichen Szenarienkatalogen zahlreiche, in der Literatur dargestellte Szenarien modelliert. Um die Fähigkeit zur konkreten Modellierung zu veranschaulichen, wurden exemplarisch die Messdaten eines Autobahnszenarios nachmodelliert. Anhand der modellierten Szenarien wurde gezeigt, dass die entwickelte Szenarienbeschreibung grundsätzlich Szenarien auf unterschiedlichen Abstraktionsgraden abbilden kann. Dabei wurde zwar bisher nur die manuelle Modellierung der Szenarien angewandt. Aufgrund des formalen Charakters der Beschreibung ist eine Implementierung von Szenarienklassifikatoren, um Szenarien automatisiert aus Simulations- oder Messdaten zu erstellen, möglich.

Die geforderte, schrittweise Detaillierung von Szenarien (A_S3) ergibt sich direkt aus dem entwickelten Konzept der Szenarienbeschreibung. Da jedes zusätzliche Element, jede zusätzliche Verhaltensweise, jeder zusätzliche oder enger eingeschränkte Parameter und jede zusätzlich definierte Ereignisabfolge die Freiheitsgrade des Szenarios und damit den Abstraktionsgrad eines Szenarios reduziert, kann dieser beliebig detailliert werden. Im Unterschied zu den meisten Ansätzen in der Literatur können dadurch auch beliebige

Abstraktionslevel in einem Szenario kombiniert werden und dadurch gezielt nur relevante Informationen detaillierter beschrieben werden.

Um gemäß Anforderung A_S4 alle relevanten Szenarien Aspekte abbilden zu können, basiert die Beschreibung auf einem erweiterbaren Alphabet. Für den Fall, dass ein relevanter Aspekt bisher nicht durch die Symbole der HSDL beschrieben werden kann, kann durch gezielte Ergänzung des Alphabets Abhilfe geschaffen werden. Bei der Modellierung der zahlreichen Beispielszenarien war das gerade zu Beginn häufig notwendig. Vor allem wenn ein Szenario neue Aspekte hinzufügt, wie beispielsweise die Modellierung von innerstädtischen Kreuzungen (Abb. 4.8) anstelle der bisherig hauptsächlich betrachteten Autobahnszenarien, sind konsequenterweise Ergänzungen vorzunehmen.

Da die Szenarienbeschreibung einerseits von menschlichen Beschreibungsformen abgeleitet wurde und andererseits auch alle Beispielszenarien manuell erstellt wurden, lässt sich folgern, dass die Beschreibungsform menschlich interpretierbar ist (A_S5). Entscheidend ist dabei jedoch ein einheitliches Verständnis der im Alphabet beschriebenen Symbole.

Der entscheidende Faktor für die Anwendung der formalen Szenarienbeschreibung ist die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Ähnlichkeitssuche. Die Anforderung an eine ausreichende Formalität der Beschreibung (A_S7) ist durch die Herleitung möglicher Vergleichsoperationen auf Basis der Beschreibung in Abschnitt 4.4 erfüllt. Eine exemplarische Plausibilisierung der Ähnlichkeitssuche wurde durch die Bewertung der gefundenen Ähnlichkeiten zwischen allen Beispielszenarien durchgeführt. Darüber hinaus wurde die Ähnlichkeitssuche auch jeweils bei der Verknüpfung der von den Szenarien unabhängig modellierten Verhaltensweisen und Risiken bewertet.

Abschließend sollen noch einige Aspekte diskutiert werden, die sich bei der beschriebenen Szenarienmodellierung als problematisch erwiesen. Um eine abstrakte Beschreibung von einzelnen Teilaspekten zuzulassen, entstehen aufgrund von unterschiedlichen Sichtweisen oder auch einfach physikalischen oder mathematischen Zusammenhängen Mehrdeutigkeiten. Das bedeutet, dass der gleiche Sachverhalt durch unterschiedliche Beschreibungen repräsentiert werden kann. Für die Modellierung ist das vorteilhaft; bei der Ähnlichkeitsbewertung von Szenarien müssen diese Mehrdeutigkeiten aber explizit berücksichtigt werden. Um dieses Problem zu lösen, muss dementsprechend die Ähnlichkeitssuche um eine Modellierung dieser Mehrdeutigkeiten ergänzt werden.

Ein Problem ergibt sich auch durch die Open World Assumption. Dadurch sind nicht beschriebene Aspekte nicht automatisch nicht vorhanden. Allerdings kann es bei der Szenarienbeschreibung teilweise relevant sein, das explizite Fehlen von Aspekten zu beschreiben. Beispielsweise ist es für die Fahrstreifenwechselentscheidung relevant, ob keine Objekte auf dem Nachbarfahrstreifen vorhanden sind. Das Problem kann durch die Erweiterung des Alphabets mit expliziten Elementen, die beispielsweise einen Freiraum darstellen, gelöst werden. Allerdings muss diese Information dann bei der Modellierung von Szenarien explizit verwendet werden, was im ersten Moment wenig intuitiv erscheint.

Grundsätzlich lässt sich für die formale Modellierung von Szenarien und vor allem den im Folgenden benötigten Szenarienbedingungen der Verhaltens- und Risikomodelle feststellen, dass die gestellten Anforderungen erfüllt werden. Dennoch ist die Erstellung der Szenarien keineswegs trivial, begünstigt aber durch die formale Struktur eine präzisere und durchdachtere Beschreibung als eine informelle Beschreibung.

5 Modellierung der Funktionsspezifikation

Das Ziel der entwickelten Technik ist die Bewertung von Risiken in Abhängigkeit von der Funktionsspezifikation. Für die Risikobewertung ist das Fahrzeugverhalten in den jeweiligen Szenarien relevant. Demnach muss dieses resultierende Fahrzeugverhalten in Abhängigkeit der Funktionsspezifikation modelliert werden. Durch die Modellierung von risikorelevanten Aspekten können die Auswirkungen einer Variation der Funktionsspezifikation direkt bewertet werden. Im Folgenden wird ein Konzept zur Modellierung der Funktionsspezifikation vorgestellt. Aufbauend auf dem Stand der Wissenschaft wird in den darauffolgenden Abschnitten detaillierter auf die Modellierung von Funktionsgrenzen und des Systemverhaltens eingegangen, bevor abschließend die Modellierung bewertet wird.

Aufgrund der aktuellen Relevanz für die Entwicklung von HAV soll die Methodik beispielhaft am Anwendungsfall des Autobahnchauffeurs untersucht werden. Dieser wurde bereits häufiger für die Analyse von automatisiertem Fahren verwendet. Eine detaillierte Funktionsbeschreibung findet sich beispielsweise im Bericht der BASt mit der ursprünglichen Ableitung der Automatisierungsstufen [2] oder auch aktuell als Anwendungsfall für das Forschungsprojekt PEGASUS [92]. Die daraus abgeleitete und verwendete Spezifikation des Systems wird in den jeweiligen Kapiteln 5.3 und 5.4 detailliert dargestellt.

5.1 Stand der Wissenschaft

Als Grundlage für eine Risikobewertung ist eine ausreichend detaillierte Beschreibung der Funktion notwendig. Beispielsweise fordern der *Code of Practice* [93, S. A13] und die ISO 26262 [13, S. 10] eine Funktionsspezifikation, die in erster Linie die Funktionsgrenzen, die Systemzustände, die Interaktion mit dem Fahrer und das Systemverhalten im Normalbetrieb sowie an Funktionsgrenzen beschreibt. Für die szenarienbasierte Risikobewertung unter den hier gewählten Einschränkungen sind vor allem die Funktionsgrenzen und das Systemverhalten in den jeweiligen Szenarien entscheidend. Die Interaktion mit dem Fahrer wird in dieser Arbeit explizit vernachlässigt und auch die logische und technische Architektur muss nicht zwingend in die Modellierung einfließen. Im Folgenden werden vorhandene Beschreibungsformen der beiden relevanten Aspekte analysiert. Dabei werden Beschreibungsformen der Spezifikation und Modellierungen von technischen Realisierungen berücksichtigt.

5.1.1 Textuelle Beschreibung

Die einfachste Beschreibungsform von Funktionen ist die textuelle Beschreibung. Durch die Beschreibung in natürlicher Sprache bietet diese Form maximale Flexibilität und Freiheitsgrade. Allerdings sind diese Beschreibungen schwer maschinell verarbeitbar und können auch bei Menschen zu unterschiedlichen Interpretationen der Beschreibung führen. Textuelle Beschreibungen können komplett frei mit beliebiger Struktur formuliert sein, wie beispielsweise die in dieser Arbeit referenzierten Funktionsbeschreibungen des Autobahnchauffeurs [2, 92].

5.1.2 Formale Beschreibung

Um die Verständlichkeit und Vollständigkeit zu verbessern, gibt es zahlreiche Ansätze, die Beschreibung zu strukturieren. Die wohl bekannteste Strukturierung der Fahraufgabe ist die Unterteilung in Navigationsebene, Bahnführungsebene und Stabilisierungsebene von Donges [94]. Eine detaillierte Struktur wird durch die Checklisten des *Code of Practice* für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen [93] vorgegeben. Durch die Kombination der detaillierten Fragen mit textueller Antwort ergibt sich zwar eine formalisierte, aber dennoch schlecht automatisiert verarbeitbare Spezifikation. Zur weiteren Formalisierung der Beschreibung der Bahnführungsebene gibt es in der Literatur zahlreiche Manöverkataloge (Abschnitt 4.1.1). Durch die Verwendung einheitlicher Manöverbegriffe kann das Systemverhalten klarer definiert werden. Bach [81] nutzt die Definition der Abfolge solcher Manöver zur Beschreibung des Verhaltens von Objekten in seiner Szenarienbeschreibung. Diese Manöver können noch beliebig weiter detailliert werden. Fastenmeier [95] stellt zur detaillierten Analyse der menschlichen Fahraufgabe eine Methodik zur Unterteilung in eng umrissene Teilaufgaben vor. Siedersberger [96] beschreibt ein Fähigkeitenkonzept, mit dem Manöver strukturiert zusammengesetzt werden können. Da dieses auch im Realfahrzeug umgesetzt wird, wird es im nächsten Abschnitt detaillierter beschrieben.

Diese strukturierte Unterteilung des Fahrverhaltens zur Bildung einheitlicher Begriffe löst aber noch nicht die Problematik der Modellierung. Eine Möglichkeit zur formalen Modellierung des Systemverhaltens bietet die im Systems Engineering eingesetzte Modellierungssprache SysML [97]. SysML unterstützt den modellbasierten Systementwurf bei der Spezifikation, dem Entwurf, der Simulation und der Validierung von komplexen Systemen und ist damit eine gute Grundlage für eine entwicklungsbegleitende Sicherheitsbewertung [98–100]. Allerdings beschränken sich die dynamischen Beschreibungen darin auf Aktivitäts-, Ablauf- und Sequenzdiagramme, in denen normalerweise Prozesse oder Zustandsautomaten beschrieben werden. Darüber hinaus sind diese Abläufe nicht zwingend eindeutig beschrieben [101].

5.1.3 Verhaltensmodelle

In dieser Arbeit wird keine statische Beschreibung des Systemverhaltens, sondern die abstrakte Modellierung der Verhaltensspezifikation im Kontext von Szenarien und Risikomodellen benötigt. Damit muss die Funktionsbeschreibung auf das zu bewertende Szenario angewendet werden. Deshalb gibt es einige Konzepte zur Verhaltenssteuerung von Fahrzeugen, die aufgrund ihrer Struktur auch für diese Modellierung interessant sind.

Reichardt [102] stellt eine Verhaltenssteuerung auf Basis von Verhaltensmustern vor. Diese bestehen aus einer Bezeichnung, Referenzen auf Objekte der Situation, einem Zustand und einer Handlungsbeschreibung. Die Handlungsbeschreibung wird durch Zustandsautomaten abgebildet. Die Aktivierung und die Verknüpfung der Verhaltensmuster erfolgen in drei Schritten. Zuerst werden auf Basis der aktuellen Situation relevante Verhaltensmuster aktiviert. Anschließend wird mit Hilfe eines Inhibitionsnetzwerks die gegenseitige Hemmung von Verhaltensweisen bestimmt. Abschließend werden alle verbleibenden Verhaltensweisen gewichtet überlagert.

Siedersberger [96] präsentiert ein Fähigkeitenkonzept basierend auf der hierarchischen Einteilung der Fähigkeiten in Verhaltensfähigkeiten, Handlungsfähigkeiten und auf unterster Ebene Fertigkeiten. Übergeordnete Fähigkeiten können jeweils auf beliebig viele unter-

geordnete Fähigkeiten zurückgreifen. Dadurch kann eine Vielzahl an komplexen Verhaltensweisen abgebildet werden. Das nicht ausführlich behandelte Entscheidungsmodul ist hier ohnehin durch eine klare Vorgabe in der Spezifikation zu ersetzen.

Schröder [103] unterteilt Verhalten anhand des Zeithorizonts in eine strategische, eine taktische und eine reaktive Schicht [103, S. 37]. Das verwendete Verhaltensnetzwerk ähnelt dem von Siedersberger. Die Verhaltensweisen sind jeweils durch eine Übertragungsfunktion zwischen Sensordaten und Aktorstellgrößen modelliert und werden auf Basis einer Motivation sowie der rückgemeldeten Aktivität und Reflexion gesteuert.

Reschka [104] und Nolte [105] schlagen explizit ihr Konzept von Fertigungsgraphen zur Beschreibung des Verhaltens automatisierter Fahrzeuge im Entwicklungsprozess vor. Vom Wirkprinzip entspricht dieser Fertigungsgraph dem Fähigkeitenkonzept von Siedersberger.

Vanholme [106] [107] [108] nutzt einen intuitiven regelbasierten Ansatz, um das Verhalten von automatisierten Fahrzeugen auf Autobahnen zu generieren. Dazu leitet er von den Verkehrsregeln sowie einigen System- und Interaktionsregeln dauerhaft geltende Regeln für die longitudinale und laterale Dynamik des automatisierten Systems ab. Diese werden in Abhängigkeit von Situationsgrößen modelliert und schränken damit den Verhaltensspielraum des HAV ein. Durch die Vorgabe von normalen und Notfallgrenzwerten werden anschließend sieben Trajektorien gebildet und auf Basis von den bisher nicht berücksichtigten Regeln die beste ausgewählt. Verkehrsregeln dienen auch in [109, 110] als Basis für die Ableitung von formalen Regeln für das Verhalten von automatisierten Fahrzeugen.

Zhao [111] nutzt einen ontologiebasierten Ansatz, um Verhaltensregeln in eine automatisierte Längsführung zu integrieren. Mit der umgesetzten, kartengestützten Geschwindigkeitsanpassung wird die Eignung von Ontologien zur Abbildung von Verhaltensregeln gezeigt.

5.2 Anforderungen und Lösungskonzept

Aus den Anforderungen an die Bewertungsmethodik ergeben sich für die Funktionsmodellierung folgende Anforderungen. Vergleichbar zu den Szenarien soll auch das Verhalten sowohl abstrakt (A_V1) als auch für eine Bewertung ausreichend konkret modelliert werden können (A_V2). Dabei muss die aktuelle Funktionsdefinition abgebildet werden (A_V3). Außerdem muss dabei das Nominalverhalten und Fehlverhalten modellierbar sein (A_V4). Das Ziel der hier entwickelten Verhaltensbeschreibung ist ein konsistentes, nachvollziehbares (A_V5) und bewertbares Gesamtverhalten auf beliebigen, im Szenarienraum definierten Szenarien abbilden zu können. Das soll trotz einzeln definierter Verhaltensanforderungen, die jeweils auf bestimmten Szenarienaspekten beruhen, umsetzbar sein.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen wird das im Folgenden beschriebene Modellierungskonzept umgesetzt. Grundsätzlich soll mit der Risikobewertung das resultierende Systemverhalten durch die spezifizierte Funktion bewertet werden. Demnach muss nicht das exakte Systemverhalten, sondern dessen Spezifikation modelliert werden, die hier in Funktionsgrenzen und Systemverhalten unterteilt wird.

Da auf den Automatisierungsleveln 3 und 4 nur ein begrenzter Betriebsbereich vorgesehen ist (beispielsweise Autobahn), sind die Funktionsgrenzen, die diesen Betriebsbereich beschreiben, ebenfalls Bestandteil der Funktionsspezifikation. Aufgrund der getrennten Modellierung von Szenarien können alle möglichen Szenarien in die Datenbank integriert werden. Deshalb müssen die Funktionsgrenzen des Systems bei der Bewertung berücksichtigt

werden, um die relevanten Szenarien auswählen zu können. Gerade bei automatisierten Funktionen der Level 3 und 4 wird der Anwendungsbereich durch Funktionsgrenzen klar eingeschränkt. Die Überwachung und Einhaltung dieser Grenzen ist dementsprechend auch ein wichtiger Bestandteil eines HAV. Dieser Anwendungsbereich (bzw. die „Operational Design Domain“ (ODD)) beinhaltet in erster Linie die Beschreibung des Straßentyps, des geografischen Gebiets, des Geschwindigkeitsbereichs und der Umweltbedingungen [5, S. 27] [112, S. 6], in denen die Funktion aktiv sein soll. Folglich muss für alle Szenarien bewertet werden, ob diese innerhalb, außerhalb oder an den Funktionsgrenzen liegen. Deshalb werden die Funktionsgrenzen auf Basis des Szenarienraums definiert. Für Szenarien außerhalb muss lediglich das Risiko einer fehlerhaften Aktivierung betrachtet werden. Innerhalb muss das definierte Systemverhalten bewertet werden. Für Szenarien, die eine Funktionsgrenze beinhalten, ist zusätzlich noch die entsprechende Übergabestrategie zu berücksichtigen.

Zur Integration des Systemverhaltens innerhalb der Funktionsgrenzen in die Risikobewertung dienen Verhaltensweisen. Diese Verhaltensweisen bestehen aus Szenarienbedingungen, Szenarienmodifikationen und Verhaltensmodellen. Die Szenarienbedingungen der Verhaltensweise definieren, in welchen Szenarien die Verhaltensweise jeweils relevant ist, ähnlich zur Aktivierung bei Reichardt [102]. Damit wird die Abhängigkeit des Systemverhaltens vom betrachteten Szenario modelliert. Die Szenarienmodifikationen beschreiben, wie die Systemverhaltensweise in der formalen Szenarienbeschreibung zum aktuellen Szenario hinzugefügt werden kann. Diese bereits in Abschnitt 3.2.2 erwähnte Modellierung ermöglicht die Zuordnung von Risiken auf Basis des Szenarios inklusive Systemverhalten. Die Verhaltensmodelle als solche bilden das risikorelevante Systemverhalten vereinfacht ab, um die geforderte Systemabhängigkeit der Risikobewertung realisieren zu können.

Durch diese Modellierung sollen gezielt einzelne Anforderungen an das Verhalten auf Basis von Szenarienaspekten definiert werden können. Das ermöglicht eine gute Begründbarkeit und Nachvollziehbarkeit der einzelnen Anforderungen. Die einzelnen Anforderungen müssen dabei deterministisch zu einem Gesamtverhalten kombiniert werden können, das jeweils für die zu bewertenden Szenarien abgeleitet werden kann. Dadurch können Spezifikationslücken und widersprüchliche Anforderungen identifiziert werden.

5.3 Modellierung von Funktionsgrenzen

Funktionsgrenzen beschreiben den Anwendungsbereich und damit die akzeptierten Szenarien. Deshalb ist eine Beschreibung im Szenarienraum direkt möglich. Im Prinzip könnten Funktionsgrenzen auf zwei Arten modelliert werden. Einerseits, dass die beschriebenen Aspekte explizit im Funktionsraum liegen und andererseits, dass die beschriebenen Aspekte explizit ausgeschlossen sind. Aufgrund der zugrundeliegenden Open World Assumption ist nur das Ausschlussverfahren mathematisch sinnvoll.

Jeder Aspekt, in denen die Funktion nicht aktiv sein soll, kann durch eine jeweilige Funktionsgrenze ausgeschlossen werden. Dieses grundsätzliche Konzept wurde bereits in [62] vorgestellt, um den Anwendungsbereich so weit einzuschränken, dass ein sicherer Betrieb gewährleistet ist. Darüber hinaus wird dadurch die explizite Modellierung aller relevanter Ausschlusskriterien notwendig. Dadurch kann eine lückenhafte Spezifikation aufgrund von fehlenden Funktionsgrenzen identifiziert werden.

Die Herausforderung entsteht wiederum bei der Verknüpfung mit den Szenarien. Grundsätzlich können Szenarien in Bezug auf den Anwendungsbereich innerhalb, außerhalb oder grenzübergreifend sein. Um entscheiden zu können, ob ein Szenario außerhalb des definierten Anwendungsbereichs liegt, sind durch Funktionsgrenzen ausgeschlossene Bereiche allerdings keine hinreichende Bedingung. Beispielsweise ist bei dem vorliegenden Autobahnchauffeur der Betrieb auf einer Landstraße durch die Funktionsgrenze *nur Autobahn* ausgeschlossen. Ein Szenario, in dem das HAV von einer Autobahn auf eine Landstraße abfährt, ist aber relevant, obwohl es das Element Landstraße enthält. Gerade das Verhalten in solchen Szenarien, in denen Funktionsgrenzen überschritten werden, sind für die Sicherheit des Systems relevant. Deshalb muss bei der Bewertung der Szenarien berücksichtigt werden, ob Bestandteile des Szenarios auch innerhalb der jeweiligen Funktionsgrenze liegen. Das wird durch die explizite Modellierung einer komplementären Bedingung ermöglicht. Bezogen auf das hier erwähnte Beispiel wird dementsprechend bei dieser Funktionsgrenze einerseits die Landstraße als Ausschlussbedingung und andererseits die Autobahn als komplementäre Einschlussbedingung modelliert.

Um auch bei der Modellierung der Funktionsgrenzen einfache Beschreibungen zuzulassen und eine effiziente, automatisierte Auswertung zu ermöglichen, können Funktionsgrenzen zusätzlich auf zwei unterschiedlichen Ausschlussebenen (AE) definiert werden. AE1 dient dazu, alle relevanten Aspekte der Funktionsgrenzen abstrakter abzubilden und somit alle Szenarien, die diese Grenze schneiden oder außerhalb liegen, grundsätzlich zuordnen zu können. Um die Szenarien zu identifizieren und automatisiert auszuschließen, die garantiert komplett außerhalb des Anwendungsbereichs liegen, dient AE2. Durch Definition spezialisierter Szenarienbedingungen und Anwendung strikterer Grenzwerte bei der Ähnlichkeitssuche können klar außerhalb liegende Szenarien automatisch gefiltert werden und damit der manuelle Bewertungsaufwand reduziert werden. Am Beispiel veranschaulicht würden dementsprechend Szenarien, in denen alle Infrastrukturelemente außerhalb der Autobahn liegen, ausgeschlossen.

Die Einteilung von Szenarien bezüglich der Funktionsgrenzen erfolgt in einem dreistufigen Vorgehen. Zuerst wird geprüft, ob das Szenario sc_i Überschneidungen mit mindestens einem ausgeschlossenen Bereich k einer Funktionsgrenzen j : $fb_{j,out,k}$ besitzt. D.h. wenn es keine Funktionsgrenze gibt, die Aspekte von dem Szenario ausschließt, gehört das Szenario eindeutig zum Anwendungsbereich:

$$ODD_{IN} = \{sc_i | \nexists j, k: sc_i \subseteq fb_{j,out,k}\} \quad (5.1)$$

Alle anderen Szenarien können außerhalb des Anwendungsbereichs ODD_{OUT} oder an dessen Grenze ODD_{BOUND} liegen. Deshalb wird im zweiten Schritt geprüft, ob es Funktionsgrenzen gibt, die das Szenario explizit ausschließen $\exists j, k: sc_i \subseteq fb_{j,out,k}$ und keinen Aspekt einschließen $\wedge \forall m: sc_i \not\subseteq fb_{j,in,m}$. Ein automatischer Ausschluss ist nur bei konkret definierten Funktionsgrenzen auf AE2 möglich:

$$ODD_{OUT} = \{sc_i | \exists j, k: sc_i \subseteq fb_{j,out,k} \wedge AE(fb_{j,out,k}) = 2 \wedge \forall m: sc_i \not\subseteq fb_{j,in,m}\} \quad (5.2)$$

Im dritten Schritt können die komplementär definierten Funktionsgrenzen genutzt werden, um Szenarien als Grenzszenarien zu identifizieren. Diese liegen sowohl innerhalb als auch außerhalb der Funktionsgrenzen. Dafür muss ein Szenario bei einer relevanten ausschließenden Funktionsgrenze auch zu einer einschließenden Grenze passen:

$$ODD_{BOUND} = \{sc_i | \exists j, k, m: sc_i \subseteq fb_{j,in,m} \wedge sc_i \subseteq fb_{j,out,k}\} \quad (5.3)$$

Für alle Szenarien, die über diese drei Bedingungen nicht eindeutig zugeordnet werden können, muss die Beziehung zu den als relevant identifizierten Funktionsgrenzen manuell klassifiziert werden. Das gilt ebenfalls für Funktionsgrenzen des AE1, die nur automatisch zugeordnet, aber nicht ausgewertet werden können.

Um die Modellierung der Funktionsgrenzen anhand der Beispielfunktion zu veranschaulichen, sind in Tabelle 5.1 die formale Beschreibung der Ein- (+FBC = $fb_{j,in,m}$) und Ausschlusskriterien (-FBC = $fb_{j,out,k}$) der Funktionsgrenze (FB) *nur Autobahn* textuell dargestellt. Alle modellierten, aus der Literatur bekannten Funktionsgrenzen des Autobahnchauffeurs sind im Anhang A.4 dargestellt. Dabei werden für die Definition der Funktionsgrenzen mehrere Bedingungen im Szenarienraum zum Ein- bzw. Ausschluss von Szenarienbereichen verwendet.

Tabelle 5.1: Exemplarische Darstellung der Beispielsystemgrenze *nur Autobahn*

Textuelle Beschreibung Funktionsgrenze	Formale Beschreibung im Szenarienraum der Funktionsgrenze FB1
Nur Autobahn oder autobahnähnliche Straßen	$FB1 - FBC17 + Infrastructure(1) . Domain = \{city\}$ $- FBC18 + Infrastructure(1) . Domain = \{other\}$ $- FBC19 + Infrastructure(1) . Domain = \{overland\}$ $+ FBC30 + Infrastructure(1) . Domain = \{highway\}$ $+ FBC39 + Infrastructure(1) . Domain = \{similar\ to\ highway\}$

5.4 Modellierung von Systemverhaltensweisen

Das Ziel der Verhaltensbeschreibung ist es, die Spezifikation einer automatisierten Funktion für quantitative Risikoabschätzungen abbilden zu können. Die Spezifikation besteht in diesem Fall aus Anforderungen an das Verhalten des Fahrzeugs. Diese müssen während der Entwicklung ausreichend detailliert werden, um die resultierende Sicherheit bei Anforderungserfüllung bewerten zu können. Da Anforderungen einen gewissen Spielraum definieren können, muss in der Bewertung jeweils die Worst-Case-Erfüllung berücksichtigt werden. Die Anforderungen an das Systemverhalten werden in dieser Methodik durch die Systemverhaltensweisen repräsentiert. Eine Systemverhaltensweise Sb setzt sich aus den Verhaltens-Szenarienbedingungen Bc , Szenarienmodifikationen Sm , einem Verhaltensmodell bm und weiteren Parametern zur automatisierten Einordnung zusammen:

$$Sb = (Bc, Sm, bm, CL, isconcr, isspec, excl, prio) \quad (5.4)$$

$$Bc = \{bc_1, \dots, bc_n | bc_i \subseteq ScSp\}$$

$$Sm = \{sm_1, \dots, sm_n | sm_i \subseteq ScSp\}$$

Dabei definieren die Verhaltens-Szenarienbedingungen Bc , in welchen Szenarien diese Verhaltensweise ausgeführt werden muss. Diese sind dementsprechend im Szenarienraum $ScSp$ definiert. Eine Verhaltensweise kann auch mehrere unabhängige Szenarienbedingungen besitzen und ist demnach relevant, wenn mindestens eine der Bedingungen vom aktuellen Szenario erfüllt wird. Durch das Hinzufügen des Verhaltens des Ego-Fahrzeugs zu dem Szenario ergibt sich ein modifiziertes Szenario inklusive Ego-Verhalten. Diese Änderung im $ScSp$ wird durch die Szenarienmodifikationen Sm beschrieben. Da diese Anpassung für jede

erfüllte Szenarienbedingungen unterschiedlich ausfallen kann, gibt es jeweils eine entsprechende Sm . Bezogen auf eine beispielhafte Definition der Reaktion auf Einscherer können in einer Bedingung Einscherszenarien ohne Ausweichmöglichkeit und in einer anderen Einscherszenarien mit der Möglichkeit eines Fahrstreifenwechsels abgebildet werden. Dementsprechend wird im ersten Fall nur eine Verzögerung und im zweiten Fall ein Fahrstreifenwechsel des Ego-Fahrzeugs durch die jeweiligen Sm hinzugefügt. Für diese Modifikationen werden die in der Szenarienbeschreibungssprache definierten Verhaltensweisen be verwendet. Abschließend beschreibt bm noch eine Verknüpfung zur risiko-relevanten Modellierung des von der Verhaltensweise zugelassenen Verhaltensbereichs. Die Werte CL , $isconcr$ und $isspec$ dienen zur Beschreibung der Abstraktionsebene und der hierarchischen Einordnung der Verhaltensweise (Abschnitt 5.4.1). Zur Abwägung zwischen Verhaltensweisen stehen noch der Verweis auf ausschließende Verhaltensweisen $excl$ sowie eine Priorität $prio \in \{1,2,3\}$ zur Verfügung (Abschnitt 5.4.2).

Diese Definition ermöglichen die szenarienbasierte Definition der benötigten Verhaltensweisen. Damit können klare Anforderungen an das Funktionsverhalten beschrieben werden. In den folgenden Abschnitten wird die schrittweise Detaillierung und die Berücksichtigung von konkurrierenden Verhaltensanforderungen anhand eines umgesetzten Beispiels erläutert.

5.4.1 Abstraktion der Verhaltensbeschreibung

Zur Umsetzung der schrittweisen Detaillierung der Modellierung können die Verhaltensweisen sowohl konkretisiert als auch spezialisiert werden. Für die Spezialisierung, also den Bezug auf einen detaillierteren Szenarienbereich, müssen die Szenarienbedingungen um zusätzliche Einschränkungen ergänzt werden. Die Konkretisierung wird durch vier unterschiedliche Konkretisierungslevel CL definiert, um verschiedenen detaillierte Modelle umsetzen zu können (Tabelle 5.2). Da es außerdem möglich ist, zwischen Modellen des gleichen Konkretisierungslevels ebenfalls Konkretisierungsbedingungen zu definieren, können die Verhaltensweisen hierarchisch sortiert werden, um beispielsweise die in der Literatur verwendeten Strukturierungen umzusetzen oder Verhaltensweisen gezielt zu Manövern zuzuordnen.

Tabelle 5.2: Definition und Veranschaulichung der unterschiedlichen Konkretisierungslevel der Verhaltensmodelle

Konkretisierungslevel	Definition	Beispiel
CL0	Keine Modellierung, rein textuelle Beschreibung des Verhaltens	Falls ein Einscherer auftritt, muss ausreichend verzögert werden.
CL1	Parametrisierung der Verhaltensbeschreibung	Einschererreaktion nach spätestens $T_{sys} = 0,5s$ nach FS-Markierungsübertritt, Verzögerung mit bis zu $a_{min} = -8 \frac{m}{s^2}$
CL2	zeitkonstante Verhaltensmodelle	Einschererreaktion nach spätestens $T_{sys} = 0,5s$ nach FS-Markierungsübertritt in Δx und mit v_{rel} , Verzögerung mit $a_{ego} = f(\Delta x, v_{rel})$
CL3	zeitabhängige Verhaltensmodelle	$a_{ego}(t) = f(\Delta x(t), v_{rel}(t), \dots)$

Auf dem abstraktesten Konkretisierungslevel CL0 sind aufgrund der freien Beschreibung nur qualitative Auswertungen durch Menschen möglich. Im Vergleich zu einer rein textuellen Funktionsspezifikation kann aber der Gültigkeitsbereich bzw. die Szenarienbedingungen dieser Verhaltensweise formal beschrieben werden. Um erste semiquantitative Abschätzungen durchführen zu können, müssen die Verhaltensbeschreibungen durch Parameter konkretisiert werden, was mit dem Konkretisierungslevel CL1 codiert wird. Die unteren beiden

Level werden zusätzlich durch Verhaltensmodelle ergänzt, die das Verhalten mathematisch abbilden. Stehen in einem Szenario ausreichend genaue Szenariendaten und Risikomodell auf einer kompatiblen Ebene zur Verfügung, können die Risiken unter Berücksichtigung der Verhaltensweisen quantifiziert werden (Kapitel 6).

Für die Risikobewertung ist grundsätzlich das Verhalten auf Fahrzeugebene entscheidend. Dieses Verhalten ist auch für die Festlegung der Funktionsspezifikation relevant. Da dieses Verhalten aber durch das Zusammenwirken von vielen unterschiedlichen, eigenständig entwickelten Fahrzeugkomponenten generiert wird, müssen neben den Spezifikationen auf Fahrzeugebene auch Anforderungen an alle beteiligten Komponenten wie beispielsweise Sensoren, Sensordatenfusion und Aktoren definiert werden können. Deshalb ist neben der Unterteilung in die vier Konkretisierungslevel bei der Verhaltensmodellierung auch die Detaillierung auf Komponentenebene möglich (Abb. 5.1). Durch Verwendung von auslegungsrelevanten Parametern innerhalb der Modelle können die Auswirkungen auf die Risikobewertung direkt abgeleitet werden.

Konkretisierungslevel	Fahrzeugebene	Komponentenebene
CL0: textuelle Beschreibung	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 2px; display: inline-block;">Text</div> Fzg-Verhalten </div>	
CL1: Parametrische Beschreibung	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 2px; display: inline-block;">$a = -8 \frac{m}{s^2}, \dots$</div> Fzg-Verhalten </div>	
CL2: Konstante Verhaltensmodelle	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 2px; display: inline-block;">$a = f(x)$</div> Fzg-Verhalten </div>	
CL3: Zeitabhängige Verhaltensmodelle	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 2px; display: inline-block;">$a(t) = f(x(t))$</div> Fzg-Verhalten </div>	

Abb. 5.1: Darstellung der Konkretisierungs- und Modellierungsebenen für Verhaltensmodelle

5.4.2 Verhaltenssteuerung

Die Verwendung von Szenarien als Bedingungen für die Definition der Verhaltensweisen entspricht dem klassischen Vorgehen bei der Entwicklung und Beschreibung von Funktionen. Allerdings ist es in Anbetracht der Szenarienvielfalt wenig zielführend, für jedes Szenario detailliert ein Verhalten festzulegen. Deshalb sollen beliebig viele, einzelne Verhaltensweisen automatisch den entsprechenden Szenarien zugeordnet werden können. Dementsprechend werden Mechanismen benötigt, um mehrere Verhaltensweisen zu einem konsistenten Gesamtverhalten zu kombinieren. Dieses Vorgehen muss zusätzlich nachvollziehbar und verständlich sein, damit die Kombination der Verhaltensweisen von den Entwicklern spezifiziert werden kann.

Aus diesen Gründen wird ein ähnliches Vorgehen wie bei der Verhaltenssteuerung von Reichardt [102] gewählt. In einem ersten Schritt werden ähnlich zu Reichardts Aktivierung alle potenziell zu einem Szenario passenden Verhaltensweisen ausgewählt, die sich dann durch gegenseitige Hemmung wieder ausschließen können. Da in der Bewertungsmethodik

allerdings abstrahierte Betrachtungen und zeitlich ausgedehnte Szenarien vorkommen, ergeben sich im Vergleich zu der Echtzeitverhaltenssteuerung deutliche Unterschiede in der Umsetzung der einzelnen Schritte. So müssen bei zeitlich ausgedehnten Szenarien manche Verhaltensweisen auch mehrfach zugeordnet werden. Beispielsweise können in einem Szenario auch zwei Einscherer auftreten, wodurch zweimal auf diese reagiert werden muss. Außerdem wird vor der Hemmung noch ein weiterer Schritt eingefügt, um jeweils die speziellste und konkreteste Ausprägung der Verhaltensweisen zu verwenden und alle anderen auszuschließen. Dazu wird innerhalb der über *isconcr* und *isspec* definierten Hierarchie der Verhaltensweisen geprüft, ob detailliertere Modelle für die gleiche Szenarienbedingung vorhanden sind. Abschließend wird anstatt der Hemmung das Zusammenwirken der unterschiedlichen Verhaltensweisen ausgewertet. Dabei können im Gegensatz zu einer Realfahrzeugsteuerung auch mehrere unterschiedliche Verhaltensentscheidungen auftreten, die ggf. getrennt bewertet werden müssen. Diese drei Schritte des Vorgehens sind in Abb. 5.2 sowohl als Ablaufdiagramm als auch schematisch veranschaulicht.

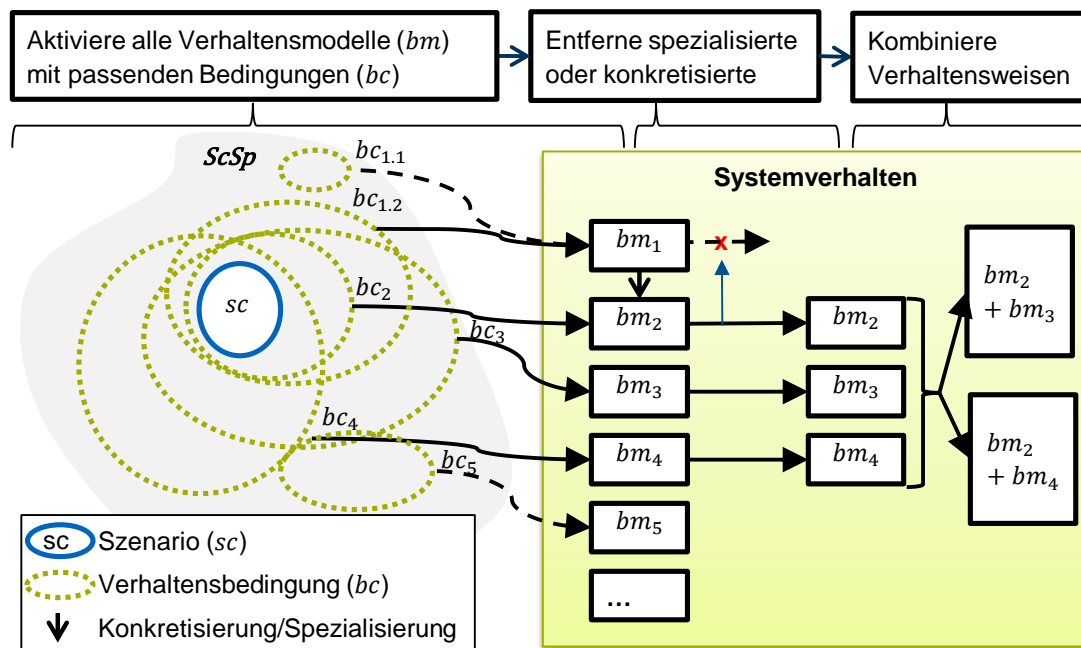


Abb. 5.2: Vorgehen zur Auswahl und Kombination relevanter Verhaltensweisen zu einem szenarienbezogenen Gesamtverhalten

Vor allem die Kombination der unterschiedlichen Verhaltensweisen im letzten Schritt stellt eine Herausforderung dar. Um auch hier die sukzessive Verfeinerung des Modells zu ermöglichen, werden Verhaltensweisen grundsätzlich als unabhängig angenommen. D.h., jede Verhaltensweise gilt grundsätzlich, wenn die ersten beiden Schritte des Auswahlprozesses erfüllt sind. Dadurch können Abhängigkeiten von Verhaltensweisen auch nachträglich oder iterativ hinzugefügt werden. Diese Abhängigkeiten werden durch die Definition von ausschließenden Verhaltensweisen *excl* definiert. So ist beispielsweise die Verhaltensweise *Fahrstreifen-halten* hinfällig, wenn gerade der Fahrstreifen gewechselt wird. Zusätzlich dient eine Priorität $prio \in \{1,2,3\}$ dazu, die Konsequenzen einer Ausschlussbedingung zu definieren. So führt der Ausschluss durch eine Verhaltensweise gleicher Priorität zum tatsächlichen Ausschluss, während der Ausschluss durch eine niedrigere Priorität optional ist und damit zwei unterschiedliche Verhaltensmöglichkeiten entstehen. Bei dem Beispiel eines Einscherers könnte eine mögliche vereinfachte Verhaltensbeschreibung lauten: *Auf Einscherer muss ausreichend verzögert werden, außer es kann durch einen Fahrstreifenwechsel*

ausgewichen werden. Abstrahiert betrachtet existieren damit die zwei Verhaltensweisen Sb_1 *Verzögern auf Einscherer* und Sb_2 *Fahstreifenwechsel als Einschererreaktion*, die zusätzlich in Beziehung zueinanderstehen. Dabei wird Sb_1 durch Sb_2 ausgeschlossen, was dem „außer“ im formulierten Beispiel entspricht. Um die Gewichtung der beiden Verhaltensweisen nachzuvollziehen, können die Prioritätsstufen $\{1,2,3\}$ sprachlich als $\{\text{muss, soll, kann}\}$ interpretiert werden. Damit ergibt sich für die formale Abbildung des Zusammenhangs für die Ausschlussbedingung von Sb_1 sowie die Prioritäten für Sb_1 und Sb_2 :

$$\begin{aligned} Sb_1 &\in \text{excl}_{Sb_2} \\ prio_{Sb_1} &= 1 \\ prio_{Sb_2} &= 3 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Damit können die in der kurzen textuellen Beschreibung unterstrichenen Aspekte formal beschrieben werden. Die formale Beschreibung dieses Vorgehens ist im Anhang A.5 beschrieben. Offensichtlich können sich durch das unscharfe *kann* bzw. *soll* Mehrdeutigkeiten ergeben. Aufgrund der Verhaltensmöglichkeiten eines HAV ist eine abstrahierte Beschreibung ohne eine gewisse Unschärfe allerdings nicht zielführend und auch nicht zwingend notwendig. Entscheidend ist jedoch, dass diese Unschärfe in der Risikobewertung berücksichtigt wird. Dementsprechend müssen für die unterschiedlichen Verhaltensmöglichkeiten jeweils unterschiedliche, ergänzte Szenarien generiert werden. Bezogen auf das vorliegende Beispiel mit dem optionalen Ausschluss durch eine niedrigere Priorität muss ein Szenario mit einem Fahstreifenwechsel sowie ein Szenario mit der Verzögerung auf den Einscherer generiert werden. Bei der Risikobewertung werden diese Szenarienalternativen dann abhängig von der Wahrscheinlichkeit des jeweiligen Verhaltens gewichtet. Neben dieser formalen Abbildung von Verhaltensabwägungen ist es auf der untersten Konkretisierungsebene auch möglich, die Verhaltensweisen zusammenzufassen und die Entscheidungsauswahl im Modell abzubilden.

Abhängig davon, ob ein Risikomodell die Kombination mehrerer Verhaltensweisen betrachtet, müssen alle gültigen Verhaltensweisen überlagert werden. Damit ergibt sich ein weiterer Unterschied zu einer realen Umsetzung wie beispielsweise der Mittelung durch Reichardt [102]. Da die Verhaltensweisen jeweils eine Anforderung an das Verhalten darstellen und demnach den verfügbaren Verhaltensspielraum eingrenzen, können diese Anforderungen überlagert werden.

5.4.3 Modellierung des Beispielverhaltens

Zur Evaluierung des entwickelten Konzepts zur Verhaltensmodellierung wird das vorgestellte Beispielsystem prototypisch umgesetzt. Für den Anwendungsfall des Autobahnchauffeurs gibt es zahlreiche hierarchische Strukturierungsansätze der Fähigkeiten des Systems. Diese können für eine Strukturierung der Verhaltensweisen auf oberster Abstraktionsebene dienen. Ausgehend von den Manöverdefinitionen in Abschnitt 4.3.2, der Beispielfunktion und unter Berücksichtigung der Arbeiten [96, 102, 113, 114] wird für die Beschreibung der Verhaltensweisen auf Konkretisierungslevel CL0 die in Abb. 5.3 dargestellte Struktur verwendet. Grundsätzlich stellen die Verhaltensweisen jeweils Anforderungen an das Gesamtverhalten dar. Durch die Strukturierung können generelle Anforderungen, die in vielen Fällen Manövern entsprechen, durch mehrere, präzisere Anforderungen abgebildet werden. Auf eine Aufteilung auf untergeordnete Fähigkeiten von einzelnen Komponenten wird auf der Ebene der Verhaltensweisen explizit verzichtet. Diese erfolgt gegebenenfalls erst innerhalb der Verhaltensmodelle.

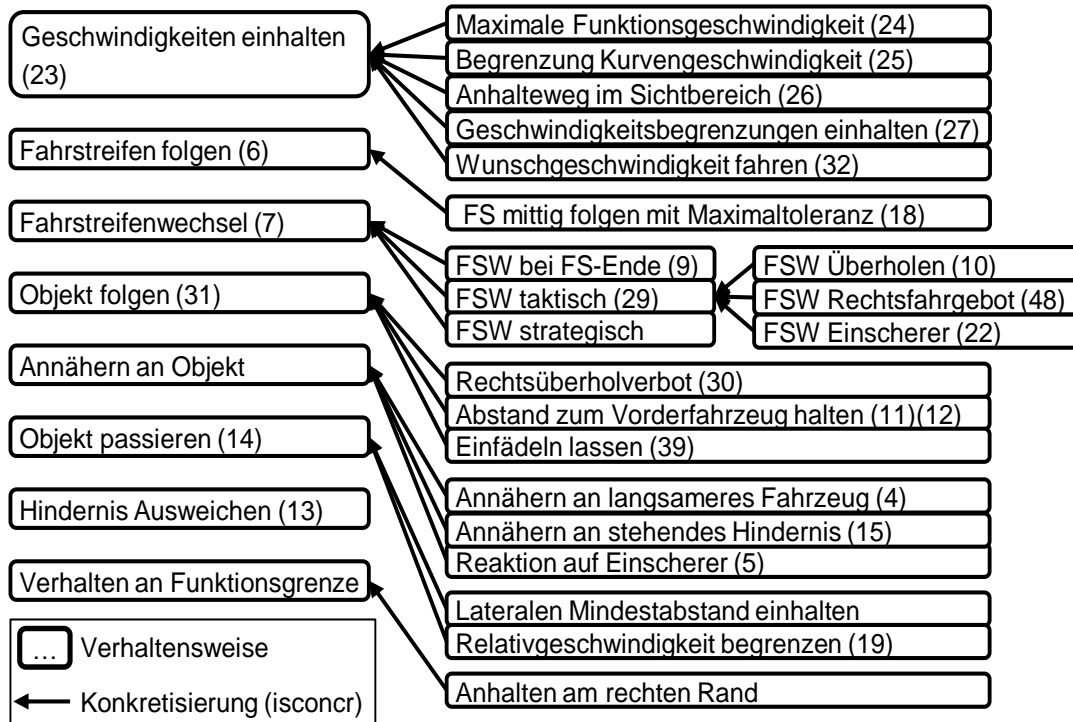


Abb. 5.3: Darstellung der hierarchischen Struktur der Verhaltensmodelle des Anwendungsbeispiels (inkl. der IDs der umgesetzten Modelle)

Neben der reinen Definition der Verhaltensweisen S_b und deren Konkretisierungsbeziehung $isconcr$ ist die Zuordnung zum Szenarienraum durch Szenarienbedingungen B_c entscheidend. Durch diese wird abgebildet, in welchen Szenarien das Fahrzeug die Verhaltensweisen ausführen muss. Bei allgemein gültigen Verhaltensweisen wie beispielsweise das Einhalten der Maximalgeschwindigkeit beschränkt sich die Szenarienbedingung lediglich auf das Vorhandensein eines Ego-Fahrzeugs. Bei einigen der konkretisierten Verhaltensweisen wird bereits durch die textuelle Namensgebung der relevante Szenarienbereich eingegrenzt. Demnach handelt es sich bei diesen abgeleiteten Verhaltensweisen auch um Spezialisierungen, weil sie einem spezifischeren Szenarienraum zugeordnet sind. Eine detaillierte Zuordnung und Auflistung der gewählten Szenarienbedingungen kann für ein tieferes Verständnis des Mechanismus dem Anhang A.6 entnommen werden.

Ausgehend von dieser abstrakten, textuellen Beschreibung der Verhaltensmodelle auf Konkretisierungslevel CL0, können die Verhaltensmodelle sukzessive präzisiert werden. Dabei gilt es, das Verhalten durch auslegungsrelevante Parameter beschreiben zu können. Bezogen auf das Beispiel des Einscherers kann definiert werden, nach welcher Systemreaktionszeit nach Überschreiten der Fahrstreifenmarkierung spätestens eine Bremsung eingeleitet wird. Durch diese Parametrierung der Anforderungen werden diese zu einem eindeutiger definiert und stehen andererseits auch als Eingangsgrößen für die Risikomodelle zur Verfügung. Neben einer einfachen Parametrierung auf CL1 können auch situationsabhängige Modelle zur Parameterbestimmung auf CL2 oder direkt simulierte Verhaltensmodelle auf CL3 integriert werden.

Damit bilden die Verhaltensweisen jeweils das Verhalten auf Fahrzeugebene ab, das für die Risikobewertung erforderlich ist. Eine Detaillierung auf Komponentenebene ist dementsprechend nur innerhalb der Verhaltensmodelle sinnvoll. Durch diese detailliertere Berücksichtigung der funktionalen Architektur des HAV ist die Definition von aussagekräftigeren Auslegungsparametern möglich. Wird beispielsweise in einem ersten Schritt die klassische

Aufteilung in ein Wahrnehmungs-, ein Planungs- und ein Ausführungsmodul modelliert, können gezielt Anforderungen an diese Bestandteile definiert werden. Durch eine solche Detaillierung lassen sich Einschränkungen des verfügbaren Planungsraums berücksichtigen, die aufgrund der Unsicherheiten und Toleranzen in der Wahrnehmung- sowie Ausführung notwendig sind.

Zur Veranschaulichung der Modellierung wird wieder auf das Beispiel der Reaktion auf einen Einscherer eingegangen. Die detaillierten Beschreibungen der anderen, relevantesten Verhaltensmodelle der Beispielfunktion sind im Anhang A.7 aufgeführt. Die größte Herausforderung bei der Reaktion auf langsamere Einscherer ist eine rechtzeitige Klassifikation und ausreichende Bremsung. Gerade die Abwägung zwischen einer schnellen Klassifikation und möglichst wenigen Falscherkennungen stellt eine große Herausforderung für die Wahrnehmung und Situationsinterpretation dar. Da hier aber nicht das genaue Funktionsverhalten modelliert werden muss, sondern lediglich die Anforderungen daran, müssen möglichst objektive Kriterien gewählt werden. Deshalb wird für die einfachste Modellierung auf CL2 das Erreichen einer konstanten Verzögerung $a_{max,ES}$ nach einer Latenzzeit $T_{Sys,ES}$ nach dem erstmaligen Überschreiten der Fahrstreifenmarkierung definiert. Durch diese beiden Parameter kann ein mindestens nötiges Verhalten definiert werden. Ausgehend von dieser Modellierung, mit der bereits eine quantitative Bewertung von Einschererrisiken ermöglicht wird, sind eine Vielzahl von relevanten Präzisierungen denkbar. Außerdem kann die Gesamtlatenzzeit auf relevante Komponenten runtergebrochen werden und somit durch die Summe aus Sensorlatenzen inkl. Wahrnehmungs- und Situationsinterpretations-Bestätigungszyklen, Planungslatenz, Regelungslatenz und Aktoriklatenz bzw. Bremsdruckaufbau zusammengesetzt werden.

Gerade die Wahrnehmung und Situationsinterpretation sind stark situationsabhängig, weshalb ab CL2 die Parameter auch abhängig von Szenarienparametern modelliert werden können. Da eine Erkennung von Einscherern in zunehmender Entfernung mit größeren Unsicherheiten in der Wahrnehmung verbunden ist, wäre es beispielsweise sinnvoll, die Anforderungen ebenfalls distanzabhängig zu definieren. So kann mit zunehmender Distanz eine längere Latenzzeit und damit mehr Bestätigungszyklen eingeräumt werden. Exemplarisch wird das für diese beiden vereinfachten Verhaltensmodellierungen anhand der resultierenden Relativgeschwindigkeit und -beschleunigung für eine höhere Erkennungszeit über 50 m Distanz in Abb. 5.4 dargestellt.

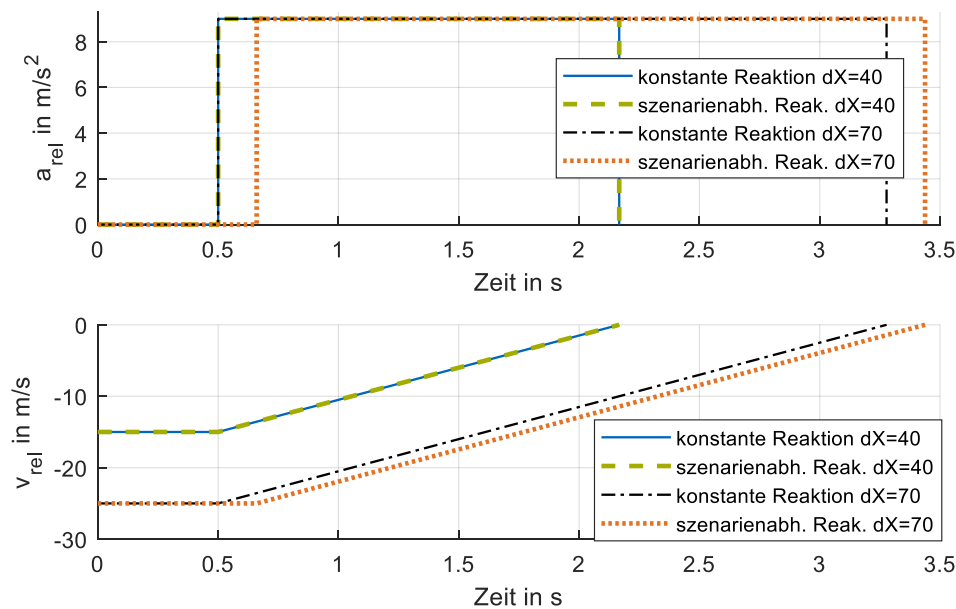


Abb. 5.4: Modellerte Verzögerungsanforderungen des konstanten und des szenarienabhängigen Einschererreaktionsmodells für zwei unterschiedliche Einscherszenarien in 40 m und 70 m Entfernung mit $-15 m/s^2$ und $-25 m/s^2$ Relativgeschwindigkeit

Auf Konkretisierungslevel CL3 können dann theoretisch beliebig detaillierte Modelle integriert werden. Durch die zeitabhängige Modellierung in Simulink können die Verhaltensweisen direkt in Abhängigkeit von relevanten Zustandsgrößen definiert werden. So sind im hier verwendeten Modell exemplarisch Wahrnehmungsmodelle mit einfacher Unsicherheitsmodellierung durch einen entfernungsabhängigen Positions- und Geschwindigkeitsoffset umgesetzt. Analog sind auch Stellgrößenbeschränkungen von Aktoren einfach implementierbar. Neben dieser sukzessiven Detaillierung des Modells können auch für die kombinierte Betrachtung von Risiken mehrere Verhaltensweisen kombiniert werden, bis theoretisch ein Modell alle relevanten Verhaltensweisen vereint. Ein generisches Modell zur kombinierten Modellierung mehrerer Verhaltensweisen wurde in [113] entwickelt. Dabei wurden die Anforderungen vor allem für die Komponenten der Wahrnehmung und Verhaltensplanung detailliert. Eine große Herausforderung bei der kombinierten Betrachtung ist, dass nicht mehr eindeutig ein Worst-Case-Verhalten ableitbar ist. Neben der Definition eines Verhaltensspielraums durch Leistungsgrenzen der modellierten Verhaltensfähigkeiten, wird deshalb vereinfachend ein Sollverhalten generiert, das für die weitere Simulation verwendet wurde. Die Präzisierung der Verhaltensmodellierung auf dieser Detailebene kann entweder durch die Notwendigkeit detaillierterer Verhaltensspezifikationen oder durch detailliertere Risikomodelle motiviert sein.

5.4.4 Modellierung von Fehlerverhalten

Nach Anforderung A4 müssen für eine umfassende Risikobewertung sowohl begrenzte Systemleistungsfähigkeit als auch Fehlfunktionen der Fahrfunktion bewertet werden. Die begrenzte Systemleistungsfähigkeit wird direkt in die Modellierung der Verhaltensweisen integriert. Exemplarisch wird das hier anhand der Reaktion auf verzögernde Vorderfahrzeuge veranschaulicht. Aufgrund des probabilistischen Charakters der Wirkketten beim automatisierten Fahren ist eine deterministische Beschreibung der Systemleistung durch einen festen Wert für eine Systemlatenzzeit stark vereinfachend. Deshalb wird die maximale Latenzzeit bis

zur Verzögerung exemplarisch mit entsprechenden Wahrscheinlichkeiten spezifiziert (Abb. 5.5).

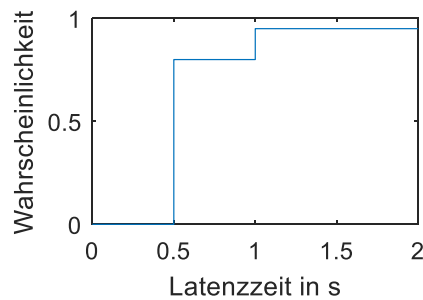


Abb. 5.5: Veranschaulichung einer einfachen probabilistischen Latenzspezifikation

Die begrenzte Leistungsfähigkeit des Systems kann neben der Reduktion von Parametern auch zur Ausführung von falschen Verhaltensweisen führen. Zur Modellierung dieses Effekts kann für jede Verhaltensweise jeweils eine Reihe von falschen Verhaltensweisen mit geringerer Priorität modelliert werden, durch die die richtige jeweils ausgeschlossen wird (Kap. 5.4.2). Durch Definition jeweils einer Fehlerwahrscheinlichkeit für die falschen Verhaltensweisen ergeben sich zusätzliche Varianten, für die die Risiken explizit berechnet werden. Durch diese Modellierung können auch explizit eigene Fehlermodelle für zufällige Fehler im Sinne der ISO 26262 in die Methodik integriert werden. Im vorliegenden Beispiel wird der Fehlerfall „Verzögerung zu spät“ und „Ausfall Verzögerung“ als Variante des Verhaltensmodells mit einer entsprechend geringen Fehlerrate integriert. Die Fehlerrate des Verhaltensmodells wird in der Berechnung des Risikos berücksichtigt.

5.5 Bewertung der Funktionsmodellierung

Zur Bewertung der entwickelten Möglichkeiten zur Verhaltensmodellierung wurde die beschriebene Beispielfunktion mit dem vorgestellten Konzept modelliert. Die an die Verhaltensmodellierung gestellten Anforderungen werden im Folgenden anhand des umgesetzten Beispielsystems bewertet.

5.5.1 Bewertung der Funktionsgrenzen

Zur Bewertung der Funktionsgrenzenmodellierung wurde für sämtliche modellierten Szenarien ausgewertet, ob die Funktionsgrenzeinstufung den Erwartungen entspricht. Von den 262 bewerteten Szenarien und Szenarienmodifikationen wurden 225 als eingeschlossen, 26 als Grenzszenarien, 4 als ausgeschlossen und 7 als nicht zuordenbar klassifiziert. Durch manuelle Überprüfung wurde ermittelt, dass alle Zuordnungen richtig erfolgt sind oder als undefiniert gekennzeichnet sind. Das starke Übergewicht der relevanten Szenarien ergibt sich dadurch, dass in erster Linie Szenarien für den vorliegenden Anwendungsfall erstellt wurden. So sind die vier ausgeschlossenen Szenarien jeweils Vergleichsszenarien aus der Literatur (Szenarien *Platho12* und *aFAS2.1* in Tabelle A.3.) sowie deren Verhaltensmodifikationen. Die Verhaltensmodifikationen entstehen durch die ergänzten Verhaltensweisen modifizierten Szenarien. Da diese Modifikationen auch für eigentlich ausgeschlossene Szenarien durchgeführt wurden, ist ersichtlich, dass der Ausschluss von Szenarien durch Funktionsgrenzen bei der Generierung der Szenarienmodifikationen in der aktuellen Umsetzung noch nicht berücksichtigt wird.

Für die Überprüfung der Identifikation von Grenzszenarien wurden auch explizit zwei Szenarien modelliert, in denen das Egofahrzeug zu Beginn auf der Autobahn und anschließend in anderen Domänen unterwegs ist. Die ebenfalls korrekte Klassifikation der restlichen Grenzszenarien beruht auf einem zu großen Geschwindigkeitsbereich des Egofahrzeugs oder auf einer explizit allgemeineren Domäne (aFAS4.1).

Bei den verbleibenden sieben, nicht zuordenbaren Szenarien sind die Definitionen nicht konkret genug. Aufgrund der Open World Assumption lässt sich deshalb keine klare Aussage treffen und dementsprechend sind diese ebenfalls richtig klassifiziert.

5.5.2 Bewertung der Systemverhaltensweisen

Ausgehend von den abstrakten, funktionalen Anforderungen an die Beispielfunktion wurde eine detaillierte, exemplarische Verhaltensmodellierung mit insgesamt 50 Verhaltensweisen unterschiedlicher Konkretisierungslevel aufgebaut. Dabei wurden lediglich die vier Verhaltensweisen zur Reaktion auf Einscherer in den Konkretisierungsleveln 0 bis 3 zur Entwicklung der Methodik verwendet [8, 60]. Zur Bewertung der Anforderungserfüllung werden demnach die Erfahrungen und Resultate der Umsetzung des Gesamtverhaltens betrachtet.

Die Erfüllung der Anforderung A_V1 einer abstrakte Verhaltensmodellierung lässt sich argumentativ begründen. Durch das Konkretisierungslevel CL0 lassen sich die abstrakten, textuellen Anforderungen in die Methodik übernehmen. Lediglich die Szenarienbedingungen, unter denen diese Anforderungen relevant sind, müssen in der formalen Beschreibungssprache modelliert werden. Durch die dabei ebenfalls mögliche, hohe Abstraktionsebene bleibt die Anforderungsmodellierung auf einer abstrakten, schnell umsetzbaren Ebene. Zur Veranschaulichung dieser Aussage sind im Anhang in Tabelle A.6.1 die Top-Level Verhaltensanforderungen und einige Konkretisierungen bzw. Spezialisierungen aufgeführt.

Die Anforderung A_V2 erfordert bewertbare Verhaltensmodelle. Die Bewertbarkeit wird erst im Zusammenspiel mit entsprechenden Bewertungsmodellen ersichtlich und wird demnach in Kapitel 6 gezeigt. Grundsätzlich lässt sich aber auch durch die hier präsentierte, schrittweise Detaillierung der Modelle begründen, dass für eine Bewertung notwendige Präzisierungen jederzeit in die Modelle integriert werden können.

Die Anforderung A_V3 setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen. Einerseits müssen alle relevanten Aspekte der Funktionsspezifikation abgebildet werden können und andererseits Änderungen in der Spezifikation effizient zu neuen Risikoeinschätzungen führen. Zum ersten Teil lässt sich aufgrund der Bewertung von A_V1 und A_V2 ableiten, dass dieser durch die Wahl eines geeigneten Abstraktionslevels gewährleistet ist. Es können aufgrund des Modellierungsaufwands nicht alle Spezifikationen eines so komplexen Systems bis ins letzte Detail in die Methodik integriert werden. Das ist für eine Risikoabschätzung aber ohnehin weder notwendig noch zielführend. Der zweite Teil der Anforderung ist allerdings nicht ohne weiteres zu erfüllen. Die Methodik unterstützt durch die automatische Zuordnung und abstrakte Modellierung der Spezifikation und Bewertung eine direkte Anpassung der Bewertung. Allerdings sind gerade abstraktere Risikomodelle nicht allgemein gültig, sondern an die genaue Problemstellung angepasst. Demnach kann eine Änderung in der Verhaltensspezifikation auch die Notwendigkeit einer Anpassung der relevanten Risikomodelle nach sich ziehen. Exemplarisch wird das in Abschnitt 6.6.3 am Beispiel der zusätzlich hinzugefügten Verhaltensweise *Relativgeschwindigkeit begrenzen* illustriert.

Die Möglichkeit, neben dem Nominalverhalten der Funktion Parameterverfälschungen und ein mit tolerierten Fehlerraten beschriebenes Fehlverhalten zu modellieren (Abs. 5.4.4), erfüllt A_V4.

Abschließend soll noch die Anforderung A_V5 eines konsistenten und nachvollziehbaren Gesamtverhalten bewertet werden. Dafür wurden für alle, zu einem spezifischen Zeitpunkt modellierten 101 Szenarien (Abschnitt 4.5.2) die Zuordnung der spezifizierten Verhaltensmodelle sowie die jeweils automatisch generierten Verhaltensmodifikationen der Szenarien ausgewertet. Dabei wurden manuell folgende Testkriterien überprüft:

- Korrektheit: Keine falschen Verhaltensweisen zugeordnet, keine ungültigen Verhaltensmodifikationen durch falsche Kombination der Verhaltensweisen
- Vollständigkeit: Alle erwarteten Verhaltensweisen richtig zugeordnet, alle notwendigen Kombinationen erzeugt
- Nachvollziehbarkeit: subjektive Bewertung, ob generierte Verhaltensmodifikationen verständlich sind

Bei der detaillierten Analyse sind mehrere Fehler identifiziert worden, die einerseits Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit der Modellierung zulassen und andererseits auch Anforderungen bei der Modellierung darstellen. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Szenarien zu abstrakt

In 10 Fällen waren zu wenig detaillierte Szenarienbeschreibungen die Ursache für eine fehlende Zuordnung der Verhaltensweisen zu Szenarien. Fehlt beispielsweise bei einem dynamischen Objekt die Angabe, dass es sich auf einem Nachbarfahrstreifen des Ego-Fahrzeugs befindet, wurde nicht die Verhaltensweise *Relativgeschwindigkeit begrenzen*, sondern lediglich die abstraktere Verhaltensweise *Annähern an Objekt* zugeordnet. Dementsprechend ist bei der Modellierung von Szenarien darauf zu achten, alle relevanten Informationen zu modellieren. Andererseits können bestimmte Informationen auch durch unterschiedliche Beschreibungsarten definiert werden. In dem Beispiel aus Abb. 4.3 kann aus den Parametern des Fahrstreifenwechsels auf den benachbarten Fahrstreifen geschlossen werden. Entsprechende Mehrdeutigkeiten könnten direkt in die Ähnlichkeitssuche integriert werden.

Bedingungen für abstrakte Verhaltensweisen zu spezifisch

Ein vergleichbares Problem tritt bei zu spezifischen Bedingungen der Verhaltensweisen auf. Gerade da die Methodik eine schrittweise Detaillierung unterstützt, sollten auf der abstraktesten Ebene der Verhaltensmodellierung auch entsprechend allgemeine Szenarienbedingungen verwendet werden. So wurde beispielsweise der Fahrstreifenwechsel am Fahrstreifenende nicht zugeordnet, weil in dem Szenario nicht explizit definiert wurde, dass mindestens zwei Fahrstreifen vorhanden sein müssen.

Bedingungen zu unspezifisch

Während auf einer abstrakten Ebene eine unspezifische Bedingung die grundsätzliche Relevanz einer Verhaltensweise anzeigen kann, ist für konkretere Verhaltensweisen eine Verknüpfung mit ausreichend spezifischen Bedingungen notwendig. Bei dem vorliegenden Fehler wurde bei der Spezifizierung des Fahrstreifenwechsels die Bedingung für einen taktischen Wechsel aufgrund eines Einschervers auf einen beliebigen Fahrstreifenwechsel eines Objekts bezogen. Damit wurden nicht nur Einschervorgänge, sondern auch Ausschervorgänge und Fahrstreifenwechsel auf ego-unabhängigen Fahrstreifen verknüpft.

Spezifikation lückenhaft

Ein großer Vorteil der präsentierten, automatischen Zuordnung von Verhaltensweisen zu Szenarien ist die Identifikation von möglichen Spezifikationslücken. Fehlt in einem Szenario eine notwendige Verhaltensweise, ist das Systemverhalten für dieses Szenario noch nicht ausreichend spezifiziert. Im vorliegenden Fall fehlte die Spezifikation des Verhaltens bei Fußgängern auf der Fahrbahn.

Konkretisierung ungleichmäßig

Bei der Konkretisierung von Modellen muss berücksichtigt werden, dass immer das konkreteste, passende Modell verwendet wird. D.h. eine übergeordnete Verhaltensweise muss durch die Konkretisierungen vollständig abgedeckt sein. Ansonsten gehen die fehlenden Verhaltensaspekte durch die Konkretisierung verloren. Im vorliegenden Fall wurde für die Verhaltensweise *Objekt passieren* lediglich die Konkretisierung *Relativgeschwindigkeit begrenzen* modelliert, aber nicht *lateralen Mindestabstand einhalten*. Dementsprechend ist der Aspekt des lateralen Abstands, der ja implizit in *Objekt passieren* enthalten ist, nicht mehr zugeordnet worden, weil nur die konkretere Verhaltensweise *Relativgeschwindigkeit begrenzen* zugeordnet wurde.

Egoverhalten in Szenarienmodifikation verdoppelt

Der letzte Fehler kann bei Szenarien entstehen, in denen das Egoverhalten bereits definiert ist. Die hier allgemein gültigen Verhaltensweisen wie Fahrstreifenfolgen wurden korrekterweise auch Szenarien zugeordnet, in denen für das Ego-Fahrzeug bereits dieses Verhalten definiert ist. Dementsprechend führte das zu einer Dopplung des Verhaltens in der Szenarienschreibung des modifizierten Szenarios. Zur Lösung dieses Problems müssen jeweils die ersten Bedingungen einer Verhaltensweise das entsprechende Verhalten des Egofahrzeugs als Bedingung und nicht als Szenarienmodifikation enthalten.

5.5.3 Diskussion der Funktionsmodellierung

Die Bewertung der Verhaltensmodellierung zeigt, dass mit dem vorgestellten Konzept auch das komplexe Verhalten einer hochautomatisierten Fahrfunktion abstrakt modelliert und in die Risikobewertungstechnik integriert werden kann. Dennoch gibt es einige Aspekte, die bei der Modellierung explizit berücksichtigt werden müssen.

Die verwendete komplementäre Modellierung zur automatischen Identifikation von Grenzszenarien funktioniert bei Parametern problemlos. Allerdings ist es auf Elementebene oder Verhaltensebene nicht mehr einfach möglich, das Komplement zu bilden, weil die Sprache beliebig erweiterbar ist und teilweise auch kein eindeutiges Komplement existiert. So ist beispielsweise das oben angeführte Beispiel der Autobahn einfach auf Basis des Parameters *Domäne* modellierbar. Ein Komplement für beispielsweise das Element *Baustelle* zu finden und in die Sprache hinzuzufügen ist zwar denkbar, allerdings werden in den seltensten Fällen solche Komplementärelemente in der Szenarienmodellierung verwendet werden. Da die Einschlussbedingungen jedoch nur für die weitere Unterteilung der von Funktionsgrenzen betroffenen Szenarien verwendet werden und nicht für die primäre Identifikation, werden dadurch nur der Umfang der automatischen Zuordnung und deshalb die Effizienz reduziert.

Eine berechtigte Frage ist auch, ob das Verhalten von hochautomatisierten Fahrzeugen in allen Situationen regelbasiert abgebildet werden kann. Das finale Verhalten bis ins letzte Detail ist damit sicherlich nicht abbildbar. Auf einer Abstraktionsebene, auf der das System

spezifiziert werden kann und damit auch Testfälle beschrieben werden müssen, ist eine solche Modellierungsform jedoch anwendbar. Die Verhaltensweisen werden in der aktuellen Umsetzung nur durch positive Szenarienbedingungen zugeordnet. Ähnlich zu den Funktionsgrenzen sind auch Ausschlussbedingungen für eine flexiblere Verhaltensbeschreibung denkbar.

Eine große Herausforderung des hier entwickelten Modellierungskonzepts ist die automatische Generierung eines konsistenten, nachvollziehbaren und bewertbaren Gesamtverhaltens auf beliebigen, im Szenarienraum definierten Szenarien. Aufgrund des logischen, auf Bedingungen und klaren Regeln beruhenden Aufbaus, wird bei dieser Methodik nur das spezifizierte Verhalten generiert. Dadurch können Spezifikationslücken, ungenaue Modellierungen sowie widersprüchliche Anforderungen bei der automatischen Zuordnung und Auswertung identifiziert werden.

Ein berechtigter Kritikpunkt an der gewählten Form der Verhaltenszuordnung betrifft die Open World Assumption. Streng genommen müssten deshalb in jedem Szenario immer alle Verhaltensweisen aktiviert werden, weil alle Bedingungen auftreten können. Deshalb wird vorausgesetzt, dass alles nicht Beschriebene für die Verhaltensauswahl irrelevant ist. Mathematisch lässt sich dieses Problem durch eine übergeordnete, komplett abstrakte Gesamtverhaltensweise lösen, die immer für alle Szenarien aktiv ist. In der praktischen Umsetzung bringt das aber keinerlei Mehrwert für die Bewertung. Ein Vorteil dieser Relevanzbedingung ist aber auch, dass eine klare Definition der Informationen notwendig ist und eine fehlende Zuordnung auf zu ungenaue Szenarienmodellierung oder auf fehlende Spezifikation hinweist.

Eine Einschränkung der Methodik ergibt sich auch bezüglich der zeitlichen Ausdehnung von betrachteten Szenarien. Durch die starken Wechselbeziehungen zwischen dem Verhalten des Egofahrzeugs und der Entwicklung einer Verkehrssituation ist die hier angenommene Trennung zwischen Szenario und spezifikationsbasiertem Ego-Verhalten nur für einen begrenzten Zeitbereich sinnvoll. Spezielle Wechselwirkungsszenarien können zwar problemlos in die Methodik integriert werden, müssen aber explizit modelliert werden und können nicht automatisch aus der Funktionsspezifikation generiert werden.

6 Modellierung von Risiken

Im folgenden Kapitel wird ausgehend vom Stand der Wissenschaft die Modellierung und Berechnung des Risikos abgeleitet. Dabei wird auch auf die Grundlagen und die Ermittlung der benötigten Teilwahrscheinlichkeiten von Szenarien, Systemverhalten, Kollisionen sowie Schäden eingegangen, bevor die Risikomodellierung anhand der aufgeführten Beispiele und Anforderungen validiert wird.

6.1 Stand der Wissenschaft

Basierend auf der verwendeten Definition des Risikos werden aus der Literatur bekannte Berechnungsmodelle sowie entsprechende Modellierungsmethoden vorgestellt. Anschließend werden die für die gewählte Risikoberechnung benötigten Terme detailliert betrachtet.

6.1.1 Risikoberechnung

Es gibt unterschiedliche Formulierungen der Risikoberechnung, die das Modellierungsproblem strukturieren. Durch Akkumulation aller Einzelrisiken kann ein ganzheitlicher Risikowert der Funktion berechnet werden. Eine solches absolutes Risikomaß kann beispielsweise durch „Integration der Schadensausmaßverteilungsfunktion“ [7, S. 163]

$$R = \int \tilde{D} P(\tilde{D}) d\tilde{D} \quad (6.1)$$

berechnet werden. Dabei steht \tilde{D} für die potenziell auftretenden Schäden und $P(\tilde{D})$ für deren Wahrscheinlichkeit. Die Darstellung durch eine einzige Größe ermöglicht zwar einen schnellen Vergleich von unterschiedlichen Systemausprägungen, jedoch sind für die Berücksichtigung der Risikobewertung während der Funktionsauslegung vor allem die einzelnen Faktoren des Risikos interessant. So betrachten Kaplan et al. [17] das Risiko explizit als Set von Tupeln aus Unfallszenarien U_s und der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Frequenz Fr und Schadensschwere D [17, S. 21]:

$$R = \{ \langle U_s, P(Fr, D) \rangle \} \quad (6.2)$$

Durch die kombinierte Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Frequenz und der Schadensschwere werden dabei explizit auch häufig vernachlässigte Unsicherheiten in deren Beschreibung berücksichtigt. Diese Beschreibung findet sich auch in den semiquantitativen Gefährdungsanalysetechniken, welche die Bewertungskriterien aus Tabelle 2.2 verwenden. Die entsprechenden Bewertungen sind durch die jeweilige Bewertungszeile mit dem Gefährdungsszenario verknüpft. Die Bewertung nach ISO 26262 [13] fügt mit der Kontrollierbarkeit noch eine zusätzliche, getrennt bewertete Wahrscheinlichkeit hinzu. Adler et al. [115, S. 4] nutzen eine ähnliche Aufteilung in die Wahrscheinlichkeit, dass ein Verhalten in

einer Situation eintritt, und die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Verhalten Schaden verursacht. Ebel et al. [116] beschreiben das Risiko durch funktionale Unzulänglichkeiten im Prinzip analog zur ISO 26262, allerdings um eine Multiplikation mit der erwarteten Fehlauflöserate Fa erweitert [116, S. 52].

Eggert [50, S. 712] unterteilt den Wahrscheinlichkeitsterm zusätzlich durch das Hinzufügen von Zuständen St und kritischen Events Ev zu:

$$R = \int \tilde{D} P(\tilde{D}|St, Ev = true)P(Ev = true|St)P(St) dSt \tag{6.3}$$

6.1.2 Risikomodelle

Für die Berechnung eines Risikos oder einzelner Bestandteile davon sind Modelle nötig. Schnieder [7, S. 208-211] unterscheidet bei der Modellierung von Verkehrssicherheit qualitative, parametrische, simulative sowie physische Modelle. Dabei bestehen qualitative Modelle aus der Beschreibung von einzelnen Funktionen sowie deren Verbindungen, wobei die Funktionen nicht näher durch Gesetzmäßigkeiten beschrieben sind. Die Klasse der parametrischen Modelle beinhaltet alle Beschreibungen auf Basis von Formeln zur Ableitung von Größen der Verkehrssicherheit. Dazu gehören auch aus statistischen Größen abgeleitete Zusammenhänge wie beispielsweise Verletzungsrisikofunktionen. Die simulativen Modelle berücksichtigen grundsätzlich noch die zeitliche Entwicklung der Systemdynamik. Dazu zählt Schnieder auch stochastische Simulationen, wie beispielsweise durch Monte Carlo Methoden. Physische Modelle bestehen nicht mehr ausschließlich aus virtuellen Modellen und beinhalten damit beispielsweise Fahrsimulatoren oder auch Realfahrzeuge auf Prüfgeländen. Für die Risikoabschätzung in dieser Arbeit sind demnach die ersten drei Modellarten relevant, für die jeweils unterschiedliche Modellierungsmöglichkeiten existieren.

In Abschnitt 2.1.2 wurden bereits wichtige Risikobewertungsmethoden eingeführt. Die meisten beinhalten bereits eine Art der qualitativen oder semiquantitativen Risikomodellierung. Im Folgenden wird detaillierter auf die Modellierungsmöglichkeiten dieser Methoden eingegangen.

Die Grundlage all dieser Modelle ist die Identifizierung und Abbildung von relevanten Risikofaktoren und deren Zusammenhänge. Die bereits eingeführte Gefährdungstheorie von Ericson (Abb. 2.1) veranschaulicht diese Aspekte (Abb. 6.1).

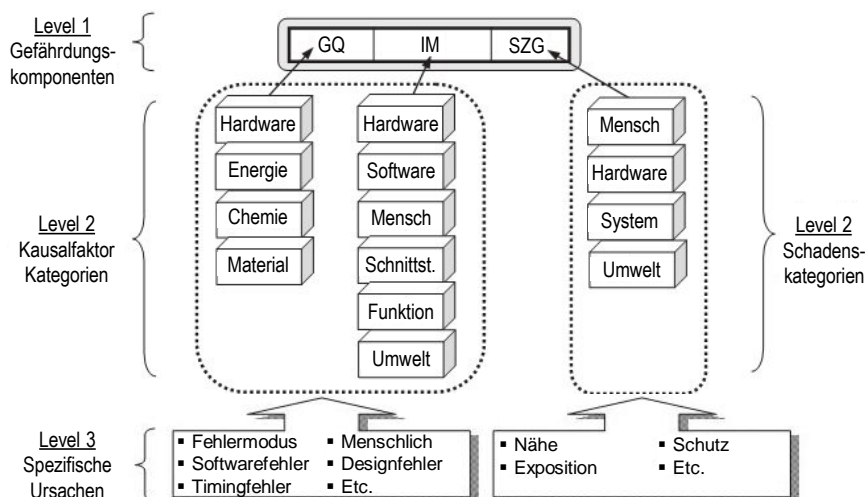


Abb. 6.1: Kausalfaktorenmodell für Gefährdungen und Risiken nach Ericson [16, S. 38]

Während bei vielen qualitativen Verfahren die Risikozusammenhänge einfach textuell und tabellarisch dokumentiert werden, nutzen quantitative Verfahren häufig Graphen zur Modellierung der Zusammenhänge (FTA, ETA, CCA, Bayessche Netze oder Petrinetze).

Neben der qualitativen Beschreibung der relevanten Zusammenhänge und Einflussfaktoren ist für die Quantifizierung von Risiken eine probabilistische Betrachtung notwendig, weil Risiko eine probabilistische Größe darstellt. Die parametrischen Modelle werden genutzt, um direkt Wahrscheinlichkeitsverteilungen der gesuchten Größen abzubilden. So kann beispielsweise für die Modellierung des Severity-Levels bei einer ISO 26262 konformen G&R eine Funktion in Abhängigkeit von Kollisionsparametern den entsprechenden S-Wert zurückgeben. Da diese S-Werte jeweils Verletzungswahrscheinlichkeiten größer 10 % beschreiben [13, S. 20], handelt es sich um eine diskretisierte, probabilistische Funktion.

Eine weitere Möglichkeit der probabilistischen Modellierung stellen stochastische Petrinetze dar [25, 42]. Durch Hinzufügen von Wahrscheinlichkeitsgewichten zu zeitlosen Transitionen bzw. Verteilungsfunktionen der Verzögerungszeit zu zeitverzögerten Transitionen wird ein stochastisches Modellverhalten ermöglicht [25, S. 34]. Da eine analytische Auswertung mit starken Restriktionen verknüpft ist, bleibt häufig nur die (Monte-Carlo-)Simulation zur Ermittlung der resultierenden Wahrscheinlichkeiten. Um die Auswertezeiten zu reduzieren und die Genauigkeit bei seltenen Transitionen zu erhöhen, stehen auch spezialisierte Abtastverfahren zur Verfügung [25, S. 38].

Bayes-Netze werden in vielen Bereichen für die Risikomodellierung verwendet [117, S. 125]. So verwendet Schamm [51, 52] automatisch generierte Bayes-Netze zur qualitativen Risikoschätzung als Teil einer Situationsinterpretation. Der große Vorteil Bayesscher Netze zur Modellierung von Risiken besteht in der Abbildung und Ausnutzung bedingter Unabhängigkeit von Zufallsvariablen [118, S. 419]. Bayes-Netze werden durch gerichtete, azyklische Graphen modelliert und repräsentieren die bedingten Wahrscheinlichkeiten von diskreten Zufallsvariablen. Aus den dabei definierten apriori Wahrscheinlichkeiten können bei vorhandenen Evidenzen für einige Zufallsvariablen durch Evidenzpropagation sämtliche aposteriori Wahrscheinlichkeiten der anderen Zufallsvariablen des Netzes berechnet werden [118, S. 451]. Vor allem die Entwicklung effizienter Propagationsalgorithmen ermöglicht die Berechnung komplexer und umfangreicher Zusammenhänge. Für eine ausführliche Beschreibungen von Propagationsalgorithmen wird auf [118–120] verwiesen.

Zur Erstellung von Risikomodellen können grundsätzlich Expertenwissen und subjektive Annahmen oder vorhandene Daten herangezogen werden [117, S. 129]. Zur Modellierung von unscharfem Expertenwissen bieten sich die Modellierungstechniken Fuzzy Logic und Dempster-Shafer an, wie sie in [121] verwendet werden. Fuzzy Logic ermöglicht durch Zuordnungsfunktionen auch unscharfes Wissen in Modelle zu integrieren, was vor allem in frühen Entwicklungsphasen vorteilhaft ist [122, S. 290]. Während die Fuzzy Logic die Unschärfe von Aussagen berücksichtigen kann, stellt die Dempster-Shafer-Theorie durch explizite Abbildung von Unwissenheit [120, S. 465] einen interessanten Ansatz zur abstrakten Beschreibung von Risiken zur Verfügung. Das von Shafer [123] entwickelte, evidenzbasierte Verfahren ermöglicht es, definierten Glaubensfunktionen auch potenzielle Unsicherheiten in der Definition abzuleiten. Im Gegensatz zur Wahrscheinlichkeitstheorie müssen sich die Glaubenswerte von einem Ereignis und dessen Komplement nicht zu Eins ergänzen. Durch die Dempster Kombinationsregel können basierend auf dieser Theorie beliebig viele unabhängige Aussagen inklusive deren Unsicherheit kombiniert werden [120, S. 470].

6.1.3 Szenarienwahrscheinlichkeiten

Ein wichtiger Bestandteil zur Abschätzung von Risiken ist die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadens. Neben der Kollisionswahrscheinlichkeit in einem Szenario wird dafür auch die Wahrscheinlichkeit des Szenarios als solches benötigt. Die Abschätzung solcher Wahrscheinlichkeiten steht selten im Fokus, wird aber bei vielen Arbeiten implizit durchgeführt. Bei der Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit kann bezüglich der verwendeten Informationen und der Methode der Informationsauswertung unterschieden werden.

Die genutzten Informationen können Expertenwissen oder Daten sein. Die Daten können zusätzlich nach ihrer Art (z.B. Fahrzeugmessdaten, Beobachterdaten, Rekonstruktionsdaten oder Infrastrukturdaten) und ihrer Herkunft (z.B. Unfalldaten, Verkehrsanalyse, Testfahrten oder Infrastrukturplanung) unterteilt werden. Als Quelle für Fahrzeugmessdaten gibt es einerseits natürliche Fahrstudien (engl: naturalistic driving studies (NDS)) bei denen Fahrzeuge mit Messequipment ausgestattet und deren Fahrten im realen Verkehr über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet werden. Beispielsweise enthält SHRP2 Daten von insgesamt ca. 32 Millionen gefahrenen Meilen (51 Millionen km), in denen durch automatische Mechanismen und manuelles Labeln Unfälle und kritische Situationen identifiziert wurden [124]. Bei EuroFOT wurden explizit die Auswirkungen von acht Fahrerassistenzsystemen anhand von ca. 1000 Fahrzeugen untersucht [125]. Allerdings sind bei diesen Studien die Daten stark auf das Benötigte reduziert und aufgrund der eingeschränkten Umfeldsensorik schlecht zur automatisierten Situationserkennung geeignet. In diesem Aspekt haben Testfahrten von aktuellen Prototypen aufgrund der großen Fortschritte in der Sensorik und der Umfelderkennung Vorteile. Zur Abschätzung der Häufigkeiten von Szenarienaspekten können auch Daten wie beispielsweise Richtlinien zur Infrastruktur [126, 127] oder allgemein erhobene Verkehrsstatistiken verwendet werden.

Die Ansätze zur Informationsauswertung variieren in ihrem Automatisierungsgrad von rein manuellen Ansätzen wie das Labeln von Videodaten bis zum automatisierten Klassifizieren von Situationen. Eine umfangreiche manuelle Analyse von Fahrstreifenwechsellvorgängen wurde beispielsweise von Fastenmeier [74] durchgeführt. Dabei wurden die Ergebnisse von zwei menschlichen Beobachtern der Situation mit den aufgezeichneten Video- und Radardaten in Bezug gesetzt und ausgewertet.

Solche manuellen Auswertungen werden meistens nachträglich durchgeführt. Damit kann auch der Messverlauf über die Situation hinaus berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu wird bei einem Großteil der veröffentlichten Methoden die Situationserkennung in Echtzeit behandelt, um situatives Funktionsverhalten auf Basis der aktuellen und vergangenen Messwerte zu ermöglichen. Dabei ist ebenfalls der Fahrstreifenwechsel aufgrund seiner Relevanz für das Fahrerassistenzsystem ACC ein weit verbreiteter Forschungsgegenstand. Dagli [128] nutzt beispielsweise ein Bayessches Netz, um die Wahrscheinlichkeit eines Fahrstreifenwechsels abzuschätzen. Die Struktur des Netzes wird dabei auf Basis von Überlegungen aufgebaut. Ganz ähnlich geht Schaller [63] vor, wobei er die Parameter des Bayesschen Netzes zur Ein- und Ausscherklassifikation durch Software-in-the-Loop (SiL) Simulationen ermittelt [63, S. 92]. Schneider [129] stellt einen ähnlichen Ansatz vor, bei dem aus Informationen zuerst Eigenschaften und dann mittels Bayesschem Netz Situationen extrahiert werden. Die Zuordnung der Eigenschaften zu den situationsbezogenen Eingängen des Bayesschen Netzes werden mittels Fuzzy-Logik zugeordnet. Tschogas [130] verwendet statt Fuzzy-Logik die Evidenztheorie von Dempster und Shafer [123], um das aktuell wahrscheinlichste Manöver des Fahrers abzuschätzen. Allerdings wird dabei vorausgesetzt,

dass immer nur eins der sechs definierten Manöver aktiv sein kann, was bei der Häufigkeitsermittlung nicht mehr gilt.

Benmimoun [131, 132] nutzt ebenfalls von Experten definierte Trigger-Bedingungen, um in den zahlreichen Messdaten von EuroFOT kritische Ereignisse automatisch zu klassifizieren. Dabei werden kritische Ereignisse der Fahrdynamik durch Auswertung von beispielsweise ESP/ABS-Eingriffen, Gierraten oder Beschleunigungen, sowie des Abstandsverhaltens durch Auswertung der Radarsensorik klassifiziert. Die ursprünglich gewählten Parameter wurden anhand von Validierungsfahrten mit Videoaufzeichnung angepasst und die Erkennung damit verbessert.

Satzoda [133] präsentiert einen regelbasierten Ansatz, um NDS-Daten automatisch zu labeln. Mit aufgezeichneten Videodaten wird zuerst eine Fahrstreifenenerkennung inklusive Tracking durchgeführt und der Abstand zu diesen ausgewertet, um Fahrstreifenwechselmanöver zu erkennen. Diese Informationen werden mit den anderen aufgezeichneten Fahrdynamikgrößen wie der Geschwindigkeit und den Beschleunigungen kombiniert. Die Auswertung erfolgt zeitschrittweise und ohne Berücksichtigung von künftigen Messwerten.

Neben den rein durch Expertenwissen aufgebauten Ansätzen wird auch maschinelles Lernen verwendet. Reichel [134] nutzt einen „Scenario based random forest“ Algorithmus zur Klassifizierung von Einfädelsituationen. Ausgangspunkt sind von Experten gewählte Merkmale, die von dem Klassifikator zeitschrittweise ausgewertet werden. Roesener [43] verwendet angelegte Klassifikatoren auf automatisch extrahierten Merkmalen, um in den EuroFOT Daten die Szenarien Freifahrt, Folgefahrt, Fahrstreifenwechsel und Einscherer zu klassifizieren. Auf Basis von gelabelten Datensets werden aus von Experten erstellten Merkmalen die relevantesten mittels Filter- und Wrappermethoden identifiziert. Er lernt verschiedene Klassifikatoren für diese Merkmale an und vergleicht die Resultate. Ein entscheidender Punkt dabei ist, dass Roesener auch explizit die Zeitreihen von Signalen mittels Segmentierung vergleicht.

Darüber hinaus gibt es auch eine große Bandbreite des Ergebnisformats der Informationsauswertung. Diese reicht von semiquantitativen Auswertungen zur Ermittlung eines diskreten Levels, wie z.B. der Exposure E0 bis E4 für die G&R der ISO 26262 [13], über einfache quantitative Modelle, wie eine mittlere Häufigkeiten [135], bis hin zu komplexen Wahrscheinlichkeitsmodellen.

Um von den klassifizierten Situationen auf Häufigkeiten oder Wahrscheinlichkeiten zu schließen, muss die Datenbasis in ein Verhältnis mit dem erwarteten Verkehrsgeschehen gesetzt werden. Gerade bei der Nutzung von Unfalldaten ist das schwer möglich und wird dadurch umgangen, dass beispielsweise bei der prospektiven Bewertung von Assistenzsystemen (Abschn. 2.2.2) die „Häufigkeit als prozentuale[r] Anteil des Unfallgeschehens“ [15, S. 54] definiert wird. Dieser Aspekt muss auch bei der Verwendung von Erprobungsdaten berücksichtigt werden, wie sie von Glauner [135] vorgeschlagen wird. Er empfiehlt eine fokussierte Erprobung von Fahrerassistenzsystemen auf Strecken mit hoher Auftretensrate und Kritikalität von Situationen. Allerdings geht er nicht näher auf die Erkennung der Situationen ein.

6.1.4 Kollisionswahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit einer Kollision in einem bestimmten Szenario ist der Term mit der größten Abhängigkeit vom Anwendungsfall. In der funktionalen Sicherheit nach ISO 26262 [13] wird der Fehlereintritt bei der Risikobewertung als gegeben angenommen. Damit hängt die

Kollisionswahrscheinlichkeit nur noch von der Vermeidung durch die Kontrollierbarkeit ab. Bei Ebel [116, S. 52] wird die Kontrollierbarkeit durch die Fehlauflöserate ergänzt. Eggert [50, S. 712] modelliert die Kollisionswahrscheinlichkeit mittels Poissonprozesse mit zeitabhängigen Eventraten in Abhängigkeit von relevanten Parametern wie z.B. dem Abstand von zwei Objekten. Bepperling [14, S. 127] reduziert die Bandbreite möglicher Unfälle auf den schwersten noch glaubwürdigen Schadensfall und berücksichtigt die Kollisionswahrscheinlichkeit durch Risikoreduktionsfaktoren sowie die Folgewahrscheinlichkeit.

Die Schätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit in Echtzeit basiert in den meisten Fällen auf der Überlagerung von angenommenen und prädierten Positionswahrscheinlichkeiten von Objekten und der Auswertung dieser Überlappungsbereiche [136–140]. Die dafür notwendigen Prädiktionen stammen teilweise auch aus der Abschätzung von Manöverwahrscheinlichkeiten [137, 141]. Ähnliche Kollisionsmodelle finden sich auch in der Luftfahrt [142]. Im Gegensatz zu diesen Modellen wird im hier vorliegenden Anwendungsfall der Szenarienablauf definiert und unterliegt damit nicht den Unsicherheiten, die durch die probabilistischen Modelle abgebildet werden.

6.1.5 Schadensschwere

In der Literatur finden sich zahlreiche Modellierungen und Vereinfachungen zur Abschätzung der erwarteten Schadensschwere von Unfällen. Adler [55, S. 202] schlägt vor, Unfälle so abstrakt wie möglich und so konkret wie nötig zu modellieren, um die Schadensschwere abschätzen zu können. Dabei muss jedoch hinzugefügt werden, dass die Schadensschwere ähnlich wie die Kollisionswahrscheinlichkeit auf unterschiedlichsten Detailgraden abgeschätzt werden kann. Die Unfallforschung beschäftigt sich bereits seit Jahrzehnten mit Modellen zur Abbildung der Korrelation zwischen Unfallschwere und Unfallfolgschwere [1, S. 43-44]. Allerdings lässt sich aufgrund zu vieler Einflussparameter „zwischen den gebräuchlichen Unfallschweren (v_{koll} , Δv , EES) und den Skalierungen zur Beschreibung der Verletzungsschwere (AIS, MAIS, ISS, PODS) für einzelne Kollisionsarten mit definiertem Aufpralltyp keine scharfe Korrelation herstellen“ [1, S. 53]. Für die Risikoabschätzung wird aber nicht zwingend eine scharfe Korrelation benötigt. Entscheidend ist, dass die Korrelation den Erwartungswert der Schadensschwere adäquat abbildet. Dazu werden aus Unfalldaten entsprechende Regressionsmodelle abgeleitet, die den Zusammenhang zwischen Unfallschwere und Unfallfolgen probabilistisch abbilden. Solche Verletzungsrisikofunktionen finden sich beispielsweise in [34] für einen Auffahrunfall zwischen Pkw sowie in [143, S. 22] für Kollisionen mit Fußgängern.

Für die Anwendung der Verletzungsrisikofunktion ist die Geschwindigkeitsänderung im Stoß notwendig. Um diese aus einer Kollisionsgeschwindigkeit abzuschätzen, werden Modellierungen auf Basis des Impulssatzes verwendet [50, S. 712]. In der Unfallmechanik wird meistens „nur die auf die Straßenebene projizierte Bewegung der Pkw betrachtet, Nick-, Wank- und Vertikalbewegungen werden vernachlässigt“ [144, S. 106]. Damit ergibt sich für die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung Δv_1 und Δv_2 im Stoß von zwei Fahrzeugen folgender Zusammenhang [144, S. 109]:

$$\Delta v_1 = \frac{m_2(1+k)}{m_1+m_2}(v_2-v_1); \Delta v_2 = \frac{m_1(1+k)}{m_1+m_2}(v_1-v_2) \quad (6.4)$$

Neben den Massen m_1 und m_2 sowie den Geschwindigkeiten zu Beginn der Kollision v_1 und v_2 der beiden Fahrzeuge spielt noch die Stoßzahl k eine entscheidende Rolle. Diese beschreibt die Plastizität der Kollision. Diese kann basierend auf Crashtests abgeschätzt

werden [145–148] oder im einfachsten Fall zu einem festen Wert angenommen werden [144, S. 104]. In dieser Arbeit werden die Ergebnisse von Kalthoff [145, S. 379] verwendet, wobei jeweils aufgrund der Worstcase-Betrachtung die obere Grenze des Stoßzahlbereichs verwendet wird (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Verwendete Stoßzahlen für Kollisionen nach [145, S. 379]

Relativgeschwindigkeit	Überdeckung	Stoßzahl
< 5 km/h		0,20 - 0,75
5 – 10 km/h		0,15 – 0,55
10 – 20 km/h	< 60 %	0,10 – 0,35
	> 60 %	0,10 – 0,45
20 – 30 km/h	< 30 %	0,00 – 0,15
	30 – 60 %	0,10 – 0,20
	> 60 %	0,15 – 0,30
30 – 70 km/h	< 30 %	0,00 – 0,10
	> 30 %	0,05 – 0,20
> 70 km/h		0,00 – 0,10

Abschließend besteht noch die Möglichkeit, die unterschiedlichen Kategorien der Schadensschwere durch eine Gewichtung mit volkswirtschaftlichen Kosten zu einem Gesamtrisikowert zu kombinieren [144, S. 57]. Allerdings ist zum Ableiten von relevanten Vermeidungsmaßnahmen bereits eine getrennte Aufschlüsselung nach Schadenskategorien ausreichend.

6.2 Anforderungen und Lösungskonzept

Analog zu den anderen Bestandteilen muss auch die Modellierung der Risiken mit abstrakten und konkreten Modellen umgehen können (A_R1). Im Kontext der Risikomodellierung müssen demnach kausale Zusammenhänge und Bewertungen abgebildet werden können. Bei der abstrakten Risikomodellierung ist dabei auch die Abbildung von unscharfem Wissen notwendig (A_R2). Außerdem müssen sich abstrakte semiquantitative Bewertungen, wie in der ISO26262 [13] gefordert, abbilden lassen (A_R3). Wie bei der Verhaltensmodellierung muss eine sukzessive Detaillierung und Erweiterung der Risikomodelle möglich sein (A_R4). Das beinhaltet auch, dass alle als relevant identifizierten Risiken und Risikoaspekte sowohl der Nominalfunktion als auch aufgrund von Fehlfunktionen abgebildet werden können (A_R5). Da Risikoabschätzungen auf einer Reihe von Annahmen beruhen, müssen die den Ergebnissen zugrundeliegenden Annahmen und Begründungen nachvollziehbar in die Methodik integriert werden (A_R6). Abschließend müssen die Risikomodelle plausible Ergebnisse liefern und im Zweifelsfall das Risiko eher überschätzen. Da für eine prospektive Risikoabschätzung keine Referenzdaten zur Verfügung stehen und damit keine Validierung möglich ist, wird nur eine Plausibilisierung der Modelle gefordert (A_R7).

Demnach sollen in die Methodik unterschiedlichste Risikomodelle integriert werden können. Ausgangspunkt sind qualitative Bewertungen, die sich je nach Relevanz in detailliertere Risikomodelle überführen lassen. Die Identifikation und Modellierung relevanter Zusammenhänge basiert auf Experteneinschätzungen, physikalischen Zusammenhängen oder vorhandenen Daten. Die Berücksichtigung der Funktionsspezifikation in Form der Verhaltensweisen geschieht entweder qualitativ durch manuelle Bewertung oder automatisiert in Form von definierten Schnittstellen auf Fahrzeugebene. Zur Integration von Parameterverteilungen werden einfache sowie abgestufte Worst-Case-Abschätzungen und beliebige parametrische Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet. Da Worst-Case-Betrachtungen bei nichtlinearen

Risikomodellen unter Umständen nicht trivial sind, wird der Umgang mit vorliegenden Parameterwerten jeweils in den einzelnen Risikomodellen spezifiziert.

Um die unterschiedlichen Risikomodelle in das Gesamtmodell integrieren zu können, müssen diese gewisse Anforderungen erfüllen. Dafür werden die zwei Kriterien Konkretisierungslevel und Risikoabhängigkeit mit vier bzw. drei Ausprägungen definiert. Einerseits werden wieder die von den Verhaltensmodellen bekannten Konkretisierungslevel CL unterschieden:

- CL0: Das oberste Konkretisierungslevel beinhaltet qualitative und semiquantitative Bewertungen ohne Modellierung. Das entspricht der klassischen, aus dem Stand der Technik bekannten Bewertung durch Experten wie beispielsweise in der ISO26262 oder den zahlreichen anderen Risikobewertungsmethoden mit einem Bewertungsschema nach Tabelle 2.2. Dabei wird von einer festen Funktionsspezifikation ausgegangen und werden für den betrachteten Szenarienbereich Worst-Case-Annahmen getroffen. Durch diesen Konkretisierungslevel können demnach bestehende Gefahren- und Risikoanalysen als Ausgangsbasis in die Methodik integriert werden.
- CL1: Hier werden die qualitativen und semiquantitativen Modellierungen durch die Berücksichtigung von Abhängigkeiten von der Funktionsspezifikation erweitert. Zur Abbildung dieses unscharfen Expertenwissens eignen sich die Techniken wie Fuzzy-Logik und die Dempster-Shafer-Theorie.
- CL2: Ab dem Konkretisierungslevel CL2 sind quantitative Bewertungen möglich. Dazu werden quantitative, zeitkonstante Risikomodelle erstellt. Damit werden die Auswirkungen von Funktionsparametern auf die Risikobewertung detailliert abgebildet. Allerdings wird vereinfachend von zeitkonstantem Egoverhalten ausgegangen.
- CL3: Auf der detailliertesten Ebene wird die Einschränkung der Zeitkonstanz aufgehoben und die Risiken auf Basis von Simulationsmodellen abgeschätzt. Dadurch können detaillierte Verhaltensmodelle in die Bewertung integriert werden. Theoretisch können auf dieser Ebene auch hoch komplexe, realitätsnahe Simulationen integriert werden. Allerdings sollen hier explizit bekannte Risiken simuliert und nicht Risiken als Zufallsprodukt einer möglichst allumfassenden Simulation identifiziert werden.

Andererseits kann nach der Risikoabhängigkeit unterschieden werden. Generell werden bei den meisten Risikoanalysen Gefährdungen getrennt voneinander betrachtet. Allerdings beeinflussen sich bei HAV die Risiken oft gegenseitig. So wird beispielsweise durch dynamischere Ausweichmanöver das Kollisionsrisiko mit einem kritischen Naheinscherrer reduziert, aber damit auch das Kollisionsrisiko mit überholenden Fahrzeugen erhöht. Um diese Aspekte bei der Modellierung berücksichtigen zu können, werden deshalb drei Stufen des Kriteriums Risikoabhängigkeit RA eingeführt.

- RA1: Unabhängigkeit: jedes Risiko wird für sich betrachtet und Unabhängigkeit angenommen
- RA2: spezifische Abhängigkeiten: explizite Berücksichtigung und Modellierung von einzelnen Verknüpfungen zwischen den Risikosträngen
- RA3: Ganzheitliche Betrachtung: ganzheitliche Betrachtung aller Risiken mit allen relevanten Querverbindungen untereinander

Bei dieser Definition wird ersichtlich, dass Verknüpfungen mit RA3 schwer überschaubar sind. Demnach kann diese Stufe erst bei einer Komplettsimulation des Verhaltens und des Umfelds

erreicht werden und ist demnach auch nur auf Konkretisierungslevel 3 relevant. Zur Verdeutlichung der Einteilung der Risikomodelle ist diese in Abb. 6.2 grafisch dargestellt.

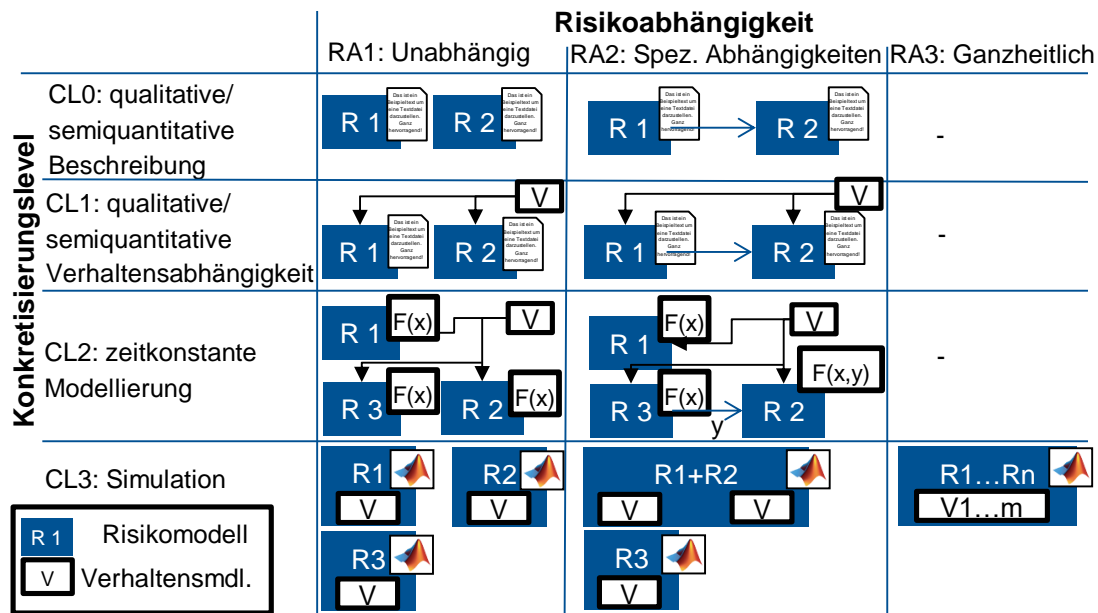


Abb. 6.2: Grafische Veranschaulichung der möglichen Modellierungskategorien für Risiken

Die integrierten Risikomodelle benötigen Schnittstellen zu den Szenarien und zum definierten Verhalten. Jedes Risikomodell besitzt für die Verknüpfung mit den Szenarien klar definierte Risiko-Szenarienbedingungen R_c analog zu den Verhaltensweisen. In diesem Bereich wird auch definiert, welche Parameter für die Risikoberechnung notwendig sind. Beispielsweise nutzt ein einfaches Risikomodell für Erscherer den Erscherabstand und die Relativgeschwindigkeit. Um die Modellierung maximal flexibel zu gestalten, können solche Parameter auch als optional gekennzeichnet werden. Damit sind diese nicht mehr Teil des zwingend erforderlichen Szenarienbereichs und werden im Risikomodell durch Standardparameter gesetzt, wenn diese nicht im Szenario definiert sind. Zu den Verhaltensmodellen sind die Schnittstellen frei in Form von beliebigen Parametern definiert.

6.3 Risikoberechnung und Modellierung

Angelehnt an die in Abschnitt 6.1.1 aufgeführten Beispiele zur Aufschlüsselung der Risikoberechnung wird im Folgenden eine für den Anwendungsfall passende Untergliederung abgeleitet. Ausgehend von dem Risiko als Integration des Produkts aller Schäden \tilde{D} mit deren Wahrscheinlichkeiten $P(\tilde{D})$ Gl. (6.1) wird die kontinuierliche Schadensgröße diskretisiert. Das Diskretisieren ist nicht nur bei den klassischen Risikobewertungsansätzen (Tabelle 2.2), sondern aufgrund der Komplexität der Schadensentstehung auch in der Unfallforschung üblich. Dabei wird gewöhnlich eine diskrete Skala von Verletzungsschweren wie beispielsweise MAIS verwendet [1]. Damit ergibt sich das Risiko als Summe über alle Schadenskategorien D :

$$R = \sum_D D P(D) \tag{6.5}$$

Da Schäden im Zusammenwirken des HAV mit der Umgebung entstehen, wird die Wahrscheinlichkeit eines Schadens $P(D)$ in Bezug zu dem aktuellen Szenario sc , wie

beispielsweise einem Einschereerszenario, gesetzt. Für disjunkte Szenarien kann über den Satz der vollständigen Wahrscheinlichkeit [118, S. 414] die Schadenswahrscheinlichkeit als Summe über alle Szenarien dargestellt werden. Da hier aber explizit eine Überschneidung von Szenarien möglich sein soll, wird der Abdeckungsfaktor δ_{sc} eingeführt, mit dem diese Überschneidungen bei der Bildung der Gesamtsumme berücksichtigt werden können.

$$P(D) = \sum_{sc} P(D|sc) \delta_{sc} P(sc) \quad (6.6)$$

Während die Einführung von HAV für die Bewertung der Unfallentstehung neue Herausforderungen mit sich bringt, wird der Einfluss auf die Unfallfolgen als vernachlässigbar angenommen, zumindest solange sich die Sitzposition der Insassen nicht deutlich ändert. Außerdem gibt es im Bereich der Unfallanalyse eine lange Tradition, die Unfallfolgeschwere aus der Unfallschwere abzuschätzen [1, S. 43-44]. Um diese Erkenntnisse des eigenständigen Forschungsfelds nutzen zu können, wird die szenarienbedingte Schadenswahrscheinlichkeit $P(D|sc)$ durch die Kollisionen C unterteilt. Im Beispiel entspricht das der Wahrscheinlichkeit für einen Auffahrunfall auf einen Einschereer in einem spezifischen Szenario sowie der Wahrscheinlichkeit der erwarteten Schadensschwere dieses Auffahrunfalls.

$$P(D|sc) = \sum_C P(D|C, sc) P(C|sc) \quad (6.7)$$

Diese Kollisionen können sämtliche zur Unfallbeschreibung üblichen Begriffe wie Unfallart, Unfalltyp etc. beinhalten. Durch Einsetzen von Gl. (6.6) und Gl. (6.7) in Gl. (6.5) ergibt sich

$$R = \sum_{sc} \delta_{sc} P(sc) \sum_C P(C|sc) \sum_D W P(D|C, sc) \quad (6.8)$$

wobei die Summe über die Schadensschwere umgestellt wurde, weil diese im Rahmen dieser Arbeit am ehesten zusammengefasst betrachtet werden kann. Außerdem werden für die Bestimmung des Risikos noch die Faktoren W benötigt, mit denen die unterschiedlichen Schäden gewichtet werden können.

Wenn sc , C und D jeweils für die berücksichtigten Szenarien sowie die dabei berücksichtigten Kollisionen und Schäden stehen, kann zur Beschreibung der Unsicherheit aufgrund von noch nicht berücksichtigten Aspekten jeweils ein zusätzlicher Summationsterm hinzugefügt werden. Im Unterschied zu [17, S. 15] gilt das neben den Szenarien auch für Kollisionen und Schäden:

$$R = \sum_{i=1}^{m+1} \delta_{sc_i, i, l} P(sc_i) \sum_{j=1}^{n(sc_i)+1} P(C_j|sc_i) \sum_{k=1}^{o(C_j)+1} W_k P(D_k|C_j, sc_i) \quad (6.9)$$

Dabei beschreiben m , n und o jeweils die Anzahl der berücksichtigten Szenarien, Kollisionen und Schäden, wobei n vom jeweiligen Szenario und o von der jeweiligen Kollision abhängt. Durch die Erhöhung der Werte um jeweils 1 steht jeweils ein Term zur Verfügung, der alle nicht berücksichtigten Faktoren abbilden kann. Durch diese mathematische Abbildung wird das grundsätzliche Problem, dass nicht alle möglichen Szenarien und Risiken im Vorfeld bekannt sind und berücksichtigt werden können, natürlich nicht gelöst. Allerdings wird dadurch ermöglicht, die entsprechende Unsicherheit explizit abzubilden.

Bei der Berechnung des Risikos nach Gl. (6.9) ist die Definition einer Risikoreferenz notwendig. Da zur Berechnung des kollektiven Risikos eines HAV noch zusätzliche Annahmen bezüglich Marktdurchdringung und Nutzungsraten getroffen werden müssten, wird in dieser Arbeit das

individuelle Risiko in Bezug auf die Nutzungsdauer des Systems verwendet. Wie auch in der ISO 26262 [13] müssen dabei zwei grundsätzliche Betrachtungsweisen berücksichtigt werden. Einerseits ist für Gefährdungen, die durch ein bestimmtes situatives Ereignis ausgelöst werden, die Frequenz dieses Ereignisses relevant. Andererseits muss für Gefährdungen, die durch ein internes Ereignis während eines zeitlich ausgedehnten Szenarios verursacht werden, der Zeitanteil dieses Szenarios berücksichtigt werden.

Allerdings ist für die hier vorliegende Risikoabschätzung weniger das Risiko als Wahrscheinlichkeit eines Schadens relevant, sondern der Erwartungswert des Risikos über alle eingesetzten Fahrzeuge. Demnach wird im Frequenzbereich der Erwartungswert der Szenarienwahrscheinlichkeit $P(sc_i)$ als durchschnittliche Häufigkeit pro Stunde automatisierter Fahrzeit verwendet, beispielsweise entspricht das der Häufigkeit von Einscherern. Tritt dagegen eine Gefahr in einem zeitlich ausgedehnten Szenario, wie beispielsweise einer Folgefahrt, auf, ist die Szenarienwahrscheinlichkeit als prozentualer Anteil der Betriebszeit aufzufassen. In diesem Fall wird der Erwartungswert der Kollisionswahrscheinlichkeit $P(C_j|sc_i)$ als durchschnittliche Häufigkeit pro Szenariostunde verwendet. Dadurch lässt sich ein Erwartungswert des Risikos in einer Einheit Schaden pro Betriebszeit ermitteln.

Das Risiko setzt sich nach Gl. (6.9) neben der Szenarienwahrscheinlichkeit noch aus der Kollisionswahrscheinlichkeit sowie der Schadenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere zusammen. Diese werden jeweils in den folgenden Abschnitten detailliert betrachtet. Die Ergebnisse der einzelnen Terme sind für die Systemauslegung und Optimierung von größerem Interesse als die Zusammenfassung zu einem Risikowert.

Die Anwendung der Gleichung variiert auch je nach betrachtetem Konkretisierungslevel der Risikobewertung. So ergibt sich für CL0 und CL1 die aus den qualitativen und semi-quantitativen Ansätzen bekannte, einfache Multiplikation der drei Größen. Beispielsweise entspricht im Vergleich zur G&R aus der ISO 26262 [13] die Szenarienwahrscheinlichkeit der Exposure, die Kollisionswahrscheinlichkeit der Controllability und die Schadensschwere sowie deren Wahrscheinlichkeit der Severity. Bei einer detaillierten Modellierung eines Risikos auf CL2 und CL3 können die einzelnen Bestandteile durch probabilistische Verteilungen der Szenarienparameter und der Kollisionsparameter voneinander abhängen (Abb. 6.3).

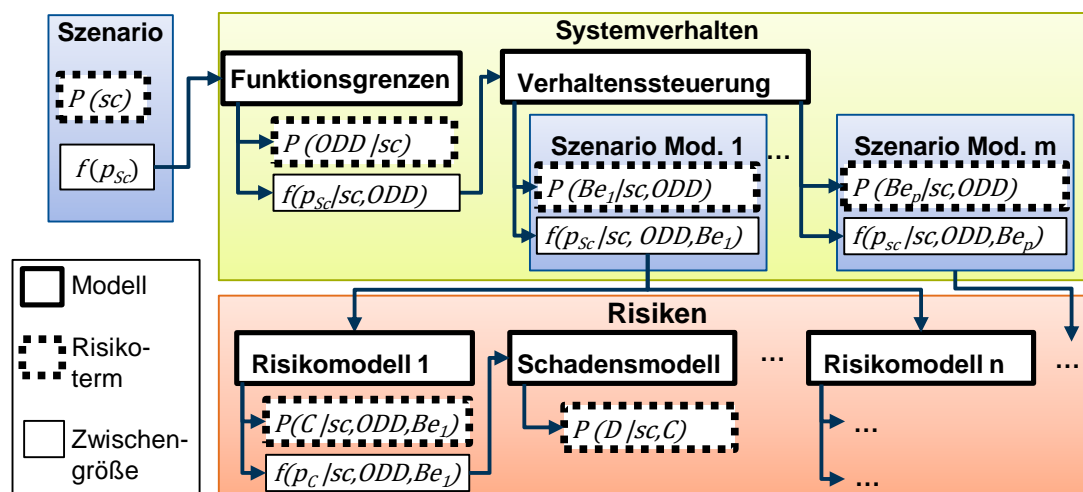


Abb. 6.3: Schematische Darstellung der Risikoberechnung für ein Szenario mit relevanten Zwischengrößen wie der Parameterverteilung $f(p_{sc})$, der Verhaltenswahrscheinlichkeit $P(Be_1)$ und den Kollisionsparameterverteilungen $f(p_c)$

Ergeben sich durch die Modellierung des Systemverhaltens unterschiedliche Varianten des Ausgangsszenarios sc_a , beispielsweise einmal eine Verzögerung und einmal ein Fahrstreifenwechsel aufgrund eines Einscherers, werden die Wahrscheinlichkeiten dieser Varianten entsprechend in der Szenarienwahrscheinlichkeit berücksichtigt:

$$P(sc_i) = P(sc_a)P(ODD|sc_a) \sum_{l=1}^p P(Be_l|sc_a, ODD) \quad (6.10)$$

Die Berechnung der jeweiligen Modelle hängt grundsätzlich von der Modellierungsart ab. So werden Bayessche Netze durch Propagationsalgorithmen gelöst, während Petrinetze oder parametrische Modelle durch Monte-Carlo-Simulationen oder effizientere Abtastverfahren berechnet werden [7, S. 376]. Außerdem besteht die Möglichkeit für eine effizientere Berechnung bestimmte probabilistische Effekte durch Worst-Case-Annahmen auszuklammern und nur bei ausreichender Relevanz detaillierter zu berücksichtigen.

6.4 Abschätzung und Modellierung von Szenarienhäufigkeiten

Ein wesentlicher Bestandteil bei der Ermittlung von Risiken ist die Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts. Um diese Wahrscheinlichkeit greifbar zu machen, wird diese in eine Szenarienwahrscheinlichkeit $P(sc)$ und eine Kollisionswahrscheinlichkeit im Szenario $P(C|sc)$ unterteilt, wobei letztere von der genauen Szenarioausprägung bzw. der Parameterwahrscheinlichkeit $f(p_{sc}|sc)$ innerhalb des Szenarios abhängt. Wie auch in Abb. 6.3 schematisch dargestellt, soll die Wahrscheinlichkeit $P(sc)$ weitgehend unabhängig vom Verhalten des Egofahrzeugs sein. Eine Beeinflussung des Szenarios durch das Egofahrzeug wird entsprechend erst durch die Verhaltensmodelle überlagert. Demnach ist $P(sc)$ eine Basiswahrscheinlichkeit ähnlich wie in ISO 26262 die Exposure [13]. Für die Modellierung der Auftretenswahrscheinlichkeit von seltenen Szenarien kann eine Poissonverteilung angenommen werden [149]. Diese kann zur Modellierung „relativ seltener zufälliger und voneinander unabhängiger Ereignisse in der Zeit-, Längen-, Flächen- oder Raumeinheit“ [149, S. 233] verwendet werden.

$$P(X = x) = P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (6.11)$$

Die Poissonverteilung wird durch den Erwartungswert der Zufallsvariable λ vollständig beschrieben. Durch Ermittlung des Erwartungswertes des Risikos können unter den Poissonannahmen Szenarienhäufigkeiten anstelle der Wahrscheinlichkeiten verwendet werden. Wird für Szenarien nicht die Auftretenswahrscheinlichkeit, sondern die Wahrscheinlichkeit der Auftretensdauer benötigt, wird der Anteil an der Gesamtbetriebszeit angenommen.

Neben der Abschätzung der Szenarienhäufigkeit müssen auch die Parameterverteilungen innerhalb der Szenarien $f(p_{sc}|sc)$ berücksichtigt werden. Diese Parameterverteilungen können grundsätzlich alle voneinander und auch von der zeitlichen Entwicklung der Parameterwerte abhängen. Je detaillierter aber die betrachteten Zusammenhänge werden, desto schwieriger ist die Generierung und Auswertung einer ausreichenden Datenbasis. Deshalb ist für eine Risikobewertung die begründete Annahme von Unabhängigkeiten und die Repräsentation über relevante charakteristische Parameter unerlässlich.

6.4.1 Klassifikation von Szenarien in Messdaten

Eine Möglichkeit für die Abschätzung der benötigten Wahrscheinlichkeiten ist die Auswertung von im Realverkehr aufgezeichneten Datensätzen. Ein Hauptproblem ist dabei immer, einen ausreichenden Umfang für valide statistische Aussagen zu erreichen. Vor allem gilt das für fehlende Datensätze von HAV-Fahrten. Deshalb wird hier das generelle Konzept zur Auswertung von solchen Messdaten vorgestellt und exemplarische Ergebnisse auf Basis von manuellen Fahrten verwendet. Mit Hilfe derselben Methodik können während der Entwicklung eingefahrene Datensätze ausgewertet werden und die getroffenen Annahmen sukzessive detailliert werden. Um für die Risikobewertung grobe Abschätzungen der Auftretenswahrscheinlichkeiten zu ermitteln, wurde eine einfache Szenarienklassifikation auf eine Datenbank mit aufgezeichneten Messdaten aktueller Erprobungsfahrten angewendet. Da diese Daten allerdings ohne Video aufgezeichnet wurden, sind die Ergebnisse nicht validierbar und dienen hier nur zur Veranschaulichung der Methodik.

Um flexibel auch die Auftretenswahrscheinlichkeit von neuen Szenarien oder spezifischen Szenarienbestandteilen ermitteln zu können, wurde von Reinhart [150] im Rahmen dieser Arbeit ein generischer Klassifikationsansatz entwickelt. Dabei werden durch eine Vielzahl von Klassifikatoren einzelne Merkmale von Szenarien identifiziert und jeweils in Objekten abgelegt. Durch Kombination und Aneinanderreihung der einzelnen Klassifikatoren können dadurch komplexe Szenarienkongstellationen erkannt werden (Abb. 6.4).

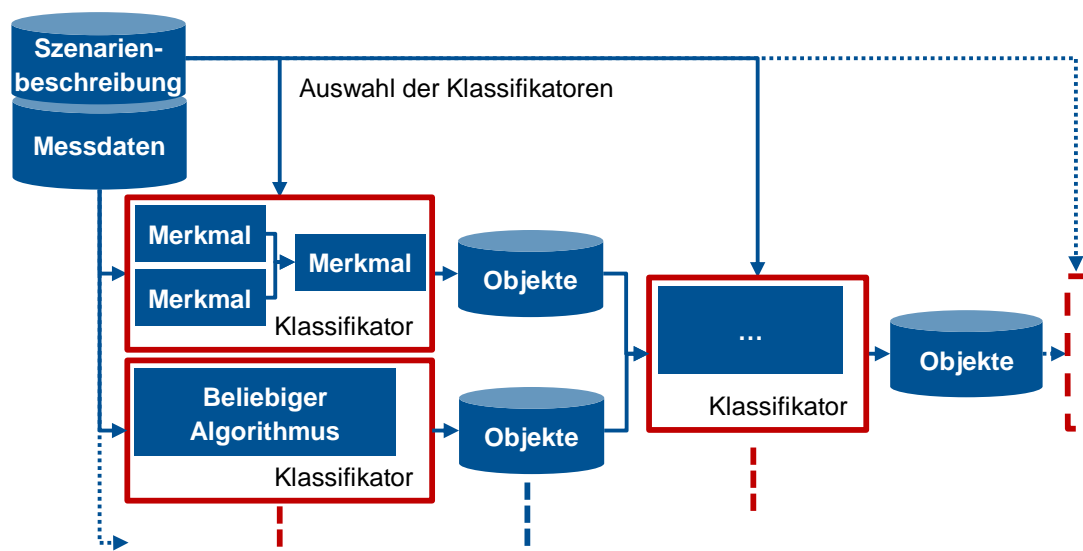


Abb. 6.4: Generischer Ansatz zur Klassifikation von Szenarien in Messdaten zur Abschätzung von Auftretenswahrscheinlichkeiten der Szenarien nach [150]

Aufgrund der klaren Definition der benötigten Szenarienbestandteilen werden als Klassifikatoren regelbasierte und Fuzzy-Logik-Ansätze verwendet, die schrittweise mehrere Merkmale prüfen. Die regelbasierte Auswertung ist vergleichbar mit dem Ansatz von Satzoda [133]. Allerdings wird explizit die gesamte Messung und damit auch künftige Werte verwendet, um z.B. den Verlauf der Fahrstreifenmarkierungen robuster zu gestalten. Mit diesem Ansatz können beliebige Klassifikatoren wie beispielsweise auf maschinellem Lernen basierende Entscheidungsbäume oder Support Vector Machines integriert werden. Als Datenbasis werden entwicklungsbegleitende Messdaten eingesetzt. Deshalb ergibt sich zusätzlich die Herausforderung, die Klassifikatoren immer an das aktuelle Sensorset sowie dessen Leistungsfähigkeit anzupassen. Zur Validierung des Klassifikationskonzepts wurde die manuelle Bewertung der entsprechenden Videodaten verwendet. Damit wird in [150] gezeigt,

dass das entwickelte Konzept zur flexiblen Szenarienklassifikation zur Abschätzung von Szenarienwahrscheinlichkeiten eingesetzt werden kann. Analog zur hier entwickelten Technik zur Risikobewertung ist es nicht das Ziel dieser Arbeit, die Bewertung als solche vollumfänglich umzusetzen, sondern die dafür notwendige Methodik zu entwickeln.

6.4.2 Ermittelte Szenarienhäufigkeiten

Da das Konzept der generischen Klassifikation von Szenarien für ein neues Sensorset entwickelt wurde, standen im Verlauf der Arbeit noch nicht ausreichend Daten zur Verfügung, um daraus Szenarienhäufigkeiten belastbar abschätzen zu können. Deshalb werden für die exemplarische Abschätzung der Häufigkeiten hier die Ergebnisse der davor entwickelten, regelbasierten Auswertung verwendet. Der Ansatz wurde auf die bei Dauerläufen und Erprobungsfahrten aufgezeichneten Messdaten von Audi-Fahrzeugen angewendet. Da die Fahrten manuell oder assistiert durchgeführt wurden, liegt der folgenden Abschätzung die Annahme zu Grunde, dass sich die Häufigkeit von Einschererszenarien nicht deutlich zwischen HAV und menschlichen Fahrern unterscheidet. Die Fahrzeuge verfügen für die hier relevante Detektion von Einscherern über zwei, rechts und links hinter dem Stoßfänger angebrachte Fernbereichsradare sowie eine Kamera hinter der Windschutzscheibe.

Um die Szenarienhäufigkeit für die exemplarische Risikobewertung abschätzen zu können, wurden insgesamt 1990 Stunden Autobahnfahrt mit einer Fahrstrecke von 212526 km in insgesamt 1153 Messfahrten ausgewertet. Wenn der hier betrachtete Geschwindigkeitsbereich von maximal 120 km/h verwendet wird, schrumpft der Datensatz auf 1013 Stunden zusammen.

Für die Ermittlung der Häufigkeit von Einscherern ist die genaue Definition des Szenarios notwendig. Grundsätzlich ist ein Einscherer relevant, sobald dieser die Fahrstreifenmarkierung zum Ego-Fahrstreifen berührt (Abb. 6.5(a)). Da in den Messfahrten vereinzelt Nebenspurstörungen, also fälschlicherweise erkannte Einscherer, vorhanden sind, wurde darüber hinaus eine mittlere Verzögerung des Ego-Fahrzeugs von mehr als -1 m/s^2 bei ausbleibendem Fahrstreifenwechsel als Bedingung definiert. Da die Fahrten manuell durchgeführt wurden und unfallfrei verliefen, können solche Fehlklassifikationen durch fehlende Verzögerung oder ausbleibende Fahrstreifenwechselreaktion identifiziert und ausgeschlossen werden.

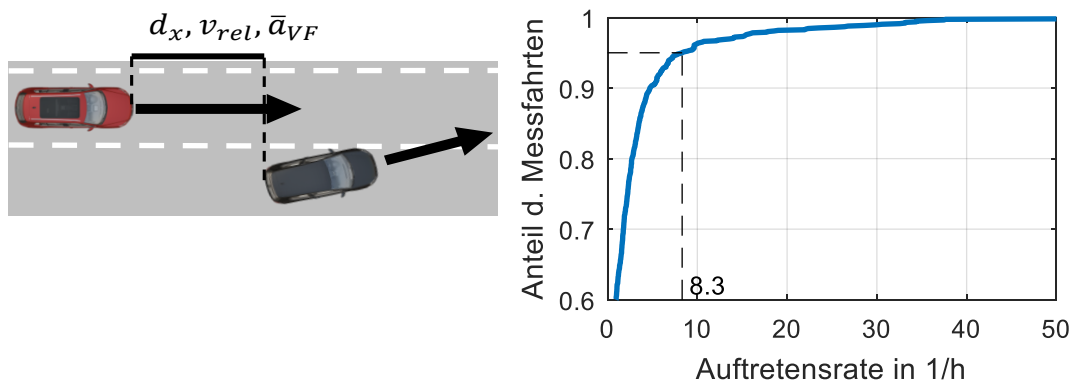


Abb. 6.5: (a) Schematische Darstellung einer Einschersituation; (b) kumulative, relative Häufigkeit von Auftretensraten des Szenarios über alle ausgewerteten Messfahrten

Basierend auf der angenommenen Poissonverteilung kann die Wahrscheinlichkeit durch die mittlere Auftretensrate beschrieben werden. Unter den beschriebenen Bedingungen ergibt sich für die Stichprobe eine mittlere Auftretensrate $\lambda_{MD} = \frac{1949}{1013,2 \text{ h}} = 1,9 \frac{1}{\text{h}}$. Offensichtlich

handelt es sich dabei jedoch nur um eine Abschätzung auf Basis einer überschaubaren Stichprobe. Um die Robustheit gegenüber einer Unterschätzung des Risikos zu erhöhen, können statistische Konfidenzintervalle [149, S. 352] ermittelt werden: $[1,8 \frac{1}{h} - 2,0 \frac{1}{h}]$. Aufgrund der geringen Stichprobe durch spezielle Versuchsfahrzeuge wird hier jedoch konservativ die höchste Rate von 95% der Messfahrten verwendet: $\lambda_{MD} = 8,3 \frac{1}{h}$ (Abb. 6.5(b)). Ausgehend von diesen ersten Abschätzungen kann bei relevanten Szenarien durch umfangreichere Datensätze eine präzisere Abschätzung erreicht werden, was aber nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit liegt.

6.4.3 Abschätzung der Häufigkeit von kritischen Ereignissen

Ein grundsätzliches Problem bei diesem Vorgehen ist eine große Menge an unkritischen Szenarien und geringe Fallzahlen von kritischen Szenarien. Um die Häufigkeit von Extremereignissen besser abschätzen zu können, wird eine Naturalistic Driving Study in die Auswertung mit einbezogen. Durch das in [124] beschriebene Vorgehen werden mit Hilfe von automatischen und manuellen Triggern sowie nachträglichem Labeln der Videodateien sowohl Unfallereignisse (Crash) als auch kritische Situationen (Near-Crash) identifiziert. Der resultierende Datensatz enthält jeweils 30 Sekunden Video- und Busdatenaufzeichnung [151]. Dadurch kann mit Hilfe dieses umfangreichen Datensatzes die Häufigkeit von besonders kritischen Ausprägungen von Szenarien besser abgeschätzt werden.

Beispielhaft wird das im Folgenden für kritische Einscherer gezeigt. Um nur die relevanten, kritischen Ereignisse für die vorliegende Problemstellung zu erhalten, werden die vordefinierten Label *Autobahn* (Freeway), das Egoverhalten *Geradeausfahrt* (going straight) und *Einscherer vor dem Fahrzeug* (other vehicle lane change only in front) verwendet. Damit bleiben selbst für die große Datenbasis von über 6,5 Millionen Fahrten [124, S. 1] nur noch 70 relevante Fälle übrig, wovon zwei tatsächlich zu einem Unfall führten. Durch manuelle Auswertung der Videoaufnahmen sowie der aufgezeichneten Bussignale, die teilweise auch den Einscherer als Radarobjekt enthalten, wurden die wichtigsten charakteristischen Szenarienparameter abgeschätzt. Diese Messwerte beinhalten teils deutliche Messungenauigkeiten und Latenzfehler, die durch die manuelle Plausibilisierung anhand des Videobildes jedoch teilweise kompensiert werden können. Darüber hinaus wird aus diesen Werten nur die statistische Verteilung der Parameter abgeschätzt, wodurch zumindest die zufälligen Messfehler weniger relevant werden. Damit können durch die große Datenbasis und die immerhin verbliebenen 70 Fälle die Wahrscheinlichkeiten im kritischen Parameterbereich fundierter abgeschätzt werden als mit den oben aufgeführten Messfahrten. Allerdings wird hier vernachlässigt, dass einerseits die Klassifikation der kritischen Szenarien nicht alle entsprechenden Szenarien identifiziert. Andererseits können Szenarien aufgrund von vorausschauenden Fahrerhandlungen entschärft und damit nicht in die Auswertung aufgenommen worden sein, obwohl diese ohne ein analog vorausschauendes Verhalten durch das HAV kritisch wären.

Der zweite entscheidende Schritt für die Nutzung der Daten ist die Ermittlung einer Referenzdauer. Aufgrund des großen Umfangs der Datenaufzeichnung wurde bisher nur die als kritisch klassifizierten Bestandteile sowie ein Set von 20000 innerhalb von SHRP2 zufällig ausgewählten Referenzszenarien detailliert ausgewertet. Um die Häufigkeiten für die Risikoberechnung zu erhalten, wird aber die Häufigkeit pro Stunde Autobahnfahrt benötigt. Da in dem vorliegenden Datensatz die detaillierten Informationen zu den Fahrdauern und Autobahnanteilen nicht enthalten sind, wird auf Basis der online abrufbaren Datenabfragen

eine Abschätzung getroffen. Dafür werden aus den als Ergebnisse ausgegebenen Histogrammen jeweils eine untere und obere Schranke sowie der Mittelwert aus den jeweiligen Werten der Grenzen und dem Mittelpunkt der Histogrammbereiche berechnet. Damit ergibt sich für die Dauer der Autobahnabschnitte ohne Ampeln ein Wert von 27,8 Jahren bei einer unteren Grenze von 4,24 und einer oberen Grenze von 49,0 Jahren Fahrzeit. Offensichtlich ergibt sich durch dieses Vorgehen eine enorme Streuung der Werte um mehr als eine Größenordnung. Um dieses Problem zu umgehen, müsste der entsprechende Datensatz erworben und detailliert ausgewertet werden. Da es hier allerdings nur um die Veranschaulichung des generellen Vorgehens zur Häufigkeitsermittlung geht, wird im Folgenden mit der Worst-Case-Annahme der 4,24 Jahre gearbeitet. Damit ergibt sich für die mittlere Auftretensrate $\lambda_{SHRP2} = \frac{70}{37142 h} = 0,0019 \frac{1}{h}$ für die als kritisch klassifizierten SHRP2 Einscherszenarien.

6.4.4 Wahrscheinlichkeiten von Szenarienparametern

Zusätzlich zu diesen Basiswahrscheinlichkeiten sind die entsprechenden Verteilungen der kritischen Parameter relevant. Grundsätzlich lassen sich Szenarien durch die zeitlichen Verläufe vieler Parameter beschreiben. Um die Komplexität auf ein handhabbares Maß zu reduzieren und statistische Aussagen treffen zu können, werden diese auf wenige, relevante Kennzahlen runtergebrochen. Je abstrakter ein Risikomodell ist, desto weniger solcher Parameter werden berücksichtigt und dementsprechend einfacher sind diese auszuwerten. Bei der Abschätzung dieser Szenarienparameter müssen Abhängigkeiten zwischen den Parametern berücksichtigt und entsprechende Modellierungen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen gewählt werden.

Grundsätzlich ergeben sich aus allen real gemessenen Szenarien jeweils Tupel mit allen Parameterwerten als Stichprobe aus den real auftretenden Parameterverteilungen. In vielen Fällen sind die auftretenden Parameter allerdings voneinander abhängig. Dadurch müssten diese einerseits in multivariaten Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet werden, was den Rechenaufwand deutlich erhöhen würde. Andererseits verteilen sich die Messpunkte der Stichprobe auf mehrere Dimensionen, wodurch die statistische Aussagekraft deutlich abnimmt bzw. deutlich mehr Messpunkte benötigt werden.

Deshalb ist es zur Vereinfachung sinnvoll, begründete Annahmen zur Unabhängigkeit von Szenarienparameter zu treffen. Wie bei vielen Aspekten der Risikoabschätzung gibt es hierbei die Möglichkeit, auf Experteneinschätzungen oder auf vorliegende Daten zurückzugreifen. Die Begründung von Unabhängigkeit ist allerdings schwierig, weil „es unendlich viele Arten der „Nicht-Unabhängigkeit““ [152, S. 250] gibt. Die Quantifizierung durch Maßzahlen wie beispielsweise Korrelationskoeffizienten beschreibt immer nur bestimmte Aspekte der Abhängigkeit [152]. Beispielsweise beschreibt der bekannteste, Pearsonsche Korrelationskoeffizient

$$\mathit{Corr}(X, Y) = \frac{\mathit{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\mathit{Var}(X)\mathit{Var}(Y)}} \quad (6.12)$$

lediglich lineare Abhängigkeiten der beiden Zufallsvariablen X, Y mit der Varianz Var und der Kovarianz Cov . Dementsprechend lässt sich aus einem Korrelationswert von $\mathit{Corr}(X, Y) = 0$ nur folgern, dass keine lineare Korrelation vorliegt, aber keine Unabhängigkeit der Zufallsgrößen beweisen.

Zur präziseren Modellierung der Abhängigkeit zwischen Zufallsvariablen können Copulas verwendet werden [152–155]. Der zugrunde liegende Satz von Sklar besagt, dass sich jede beliebige multivariate Verteilung in ihre Randverteilungen und ihre Copula zerlegen lässt [155, S. 222]. Die Randverteilungen sind dabei die Verteilungen der einzelnen Zufallsvariablen. Damit können theoretisch unabhängig modellierte Variablen mit der richtigen Copula zu ihrer multivariaten Verteilung zusammengefügt werden. Basierend auf diesem Prinzip können auch Rangkorrelationskoeffizienten wie der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient r_s [152, S. 276] abgeleitet werden, die nur von der Copula abhängen,

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n R(x_i)R(y_i) - n\overline{R(x)}\overline{R(y)}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n R(x_i)^2 - n\overline{R(x)}^2)(\sum_{i=1}^n R(y_i)^2 - n\overline{R(y)}^2)}} \quad (6.13)$$

mit den mittleren Rangzahlen $\overline{R(x)}$ und $\overline{R(y)}$. Dieser berechnet sich demnach analog zum Pearsonschen Koeffizienten nur mit den Rangfolgen anstelle der konkreten Werte. Mit Hilfe der vorgestellten Korrelationskoeffizienten lässt sich demnach prüfen, ob angenommene Unabhängigkeiten durch die vorliegenden Daten widerlegt werden und dementsprechend eine zu große Vereinfachung darstellen. Für das vorliegende Beispiel von Einscherern, die vereinfacht durch die Dynamikgrößen des Abstandes d_x und der Relativgeschwindigkeit $v_{rel,x}$ zum Zeitpunkt des Fahrstreifenübertritts sowie der mittleren Beschleunigung des Vorderfahrzeugs $\bar{a}_{pv,x}$ modelliert werden (Abb. 6.5), ergeben sich die in Tabelle 6.2 dargestellten Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Messgrößen.

Offensichtlich sind der Einscherabstand und die Relativgeschwindigkeit nach den Korrelationskoeffizienten stärker miteinander korreliert als mit der mittleren Beschleunigung des Einscherers. Demensprechend wird die Beschleunigung im Folgenden als unabhängig angenommen. Die Notwendigkeit der kombinierten Betrachtung von $v_{rel,x}$ und d_x wird vor allem bei der Einschränkung auf kritische Szenarien noch größer. So liegen die Pearson- und Spearman Korrelationskoeffizienten der SHRP2-Einscherer Szenarien bei -0,716 bzw. -0,832.

Tabelle 6.2: Korrelationskoeffizienten für relevante Parameter des Einschererszenarios allgemein (sowie für die kritischen SHRP2 Szenarien)

Parameter	Pearson	Spearman
$v_{rel,x}, d_x$	-0.109 (-0,716)	-0.160 (-0,832)
$v_{rel,x}, \bar{a}_{pv,x}$	-0.042	-0.072
$d_x, \bar{a}_{pv,x}$	-0.062	-0.032

Zur Modellierung univariater Parameter stehen zahlreiche unterschiedliche parametrische Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Verfügung, wie sie beispielsweise in [149, 152] ausführlich beschrieben werden. In Abb. 6.6(a) ist exemplarisch die Anpassung von drei Wahrscheinlichkeitsverteilungen an die vorliegenden Daten der mittleren Beschleunigungen dargestellt. Neben der logistischen Verteilung als Vertreter der klassischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind noch die t-Verteilung mit Lage-Skalen-Parameter sowie ein Normal-Kerndichteschätzer [153] und eine grobe Histogrammnäherung abgebildet. Letztere zeichnet sich durch einfache Anwendbarkeit aus und ist vor allem bei komplexen Werteverteilungen, ungenügender Datenlage oder für eine erste Abschätzung zu empfehlen. Allerdings muss dabei das Risiko entlang einer Parameterrichtung monoton steigen, um bei der Risikoberechnung die jeweilige Worst-Case-Grenze der Histogrammbereiche wählen zu können.

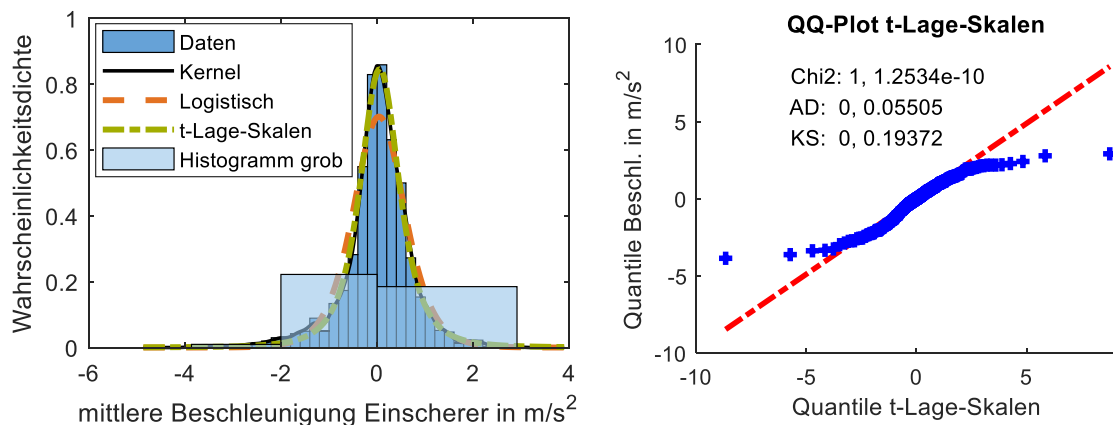


Abb. 6.6: (a) Angepasste Wahrscheinlichkeitsverteilungen an die mittleren Beschleunigungsdaten und (b) Quantile-Quantile-Plot der t-Lage-Skalenverteilung mit den Ergebnissen der Anpassungstests

Zur Bewertung, ob die gewählten Verteilungsmodelle für die vorliegende Problemstellung geeignet sind, existieren einerseits grafische Verfahren, wie beispielsweise Quantile-Quantile-Plots (Q-Q-Plot) [153, S. 67]. In Abb. 6.6(b) sind in dem QQ-Plot die deutlichen Abweichungen zwischen der t-Lage-Skalen-Verteilung und den Beschleunigungsdaten zu erkennen, was auf eine unpassende Verteilungsfunktion hinweist. Da die Verteilung die Wahrscheinlichkeit im Bereich der kritischen, negativen Werte überschätzt, wäre diese dennoch eine akzeptable Option. Andererseits stehen neben der optischen Evaluation auch statistische Anpassungstests zur Verfügung. Diese testen allerdings nur, ob eine gewählte Verteilung aufgrund der Stichprobe mit einem gewissen Signifikanzniveau abgelehnt wird. Die Ergebnisse der drei wichtigsten Anpassungstests sind in Abb. 6.6(b) in Textform angegeben. Der Kolmogorov-Smirnov-Test (KS) bewertet die maximale Abweichung zwischen der gewählten Verteilung und der hypothetischen Stichprobenverteilung [152, S. 303]. Der Anderson-Darling-Test (AD) beruht auf demselben Prinzip, bewertet allerdings den gewichteten, integrierten quadratischen Abstand [152, S. 305]. Dagegen wird beim χ^2 -Anpassungstest (Chi2) die gewählte Verteilung mit dem Histogramm der Messwerte verglichen [152, S. 306]. Im vorliegenden Fall wird die Verteilung nur durch den χ^2 -Test abgelehnt. Konkret liegt das in erster Linie an einer Unterschätzung von moderaten Verzögerungen zwischen -2,5 und -1 m/s² sowie an einer Überschätzung von Beschleunigungen über 2,3 m/s².

Im Kontext der Risikobewertung ergibt sich dabei zusätzlich die Herausforderung, dass vor allem auch seltene Extremwerte eine entscheidende Rolle spielen können und dementsprechend modelliert werden müssen. Für die Modellierung von den Randbereichen, in denen seltene und extreme Ereignisse auftreten, stehen die Methoden Block-Maxima und Peaks-over-Threshold der Extremwerttheorie zur Verfügung. Dabei werden entweder die jeweiligen Maximalwerte einzelner Abschnitte einer Stichprobe oder alle Werte über einem gewissen Grenzwert als Modellierungsgrundlage verwendet [154, S. 27]. In Abb. 6.7 sind die mittels generalisierter Paretoverteilung modellierten Beschleunigungswerte unter dem Grenzwert -2 m/s² dargestellt.

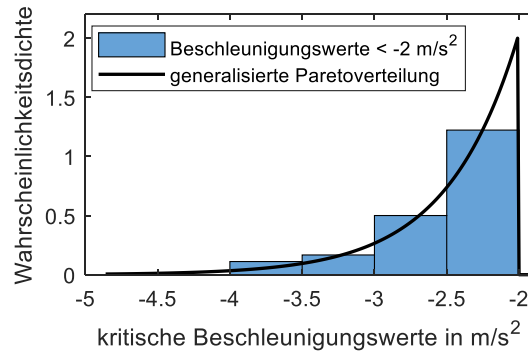


Abb. 6.7: Separate Modellierung des Extremwertbereichs mittels generalisierter Paretoverteilung

Können die Abhängigkeiten zwischen mehreren relevanten Parametern nicht vernachlässigt werden, muss eine multivariate Wahrscheinlichkeitsverteilung geschätzt werden. Sollten die Parameter als normalverteilt angenommen werden können, ist eine Modellierung durch die multivariate Normalverteilung möglich [152, S. 38]. Andernfalls kann das oben eingeführte Konzept der Copulas zur Nachbildung der Abhängigkeit der Parameterverteilungen verwendet werden. Dabei werden zuerst die Randverteilungen, also die Verteilungen der einzelnen Parameter, und anschließend die zugehörige Copula geschätzt. Zur Veranschaulichung sind der ursprüngliche Datensatz und ein gezogenes Ergebnis von einer Modellierung mittels t-Copula in Abb. 6.8 dargestellt. Für die Schätzung der Randverteilungen werden dabei Kernschätzer verwendet. Sollte eine Parameterverteilung nicht adäquat durch eine Copula abgebildet werden können, besteht als dritte Variante noch die Möglichkeit multivariate Histogramme oder Kerndichteschätzer zu verwenden. Im Gegensatz zu mehrdimensionalen Histogrammen haben die Kerndichteschätzer die Vorteile, dass sie nicht von der Intervalleinteilung abhängig sind und stetige Funktionen liefern [153, S. 76].

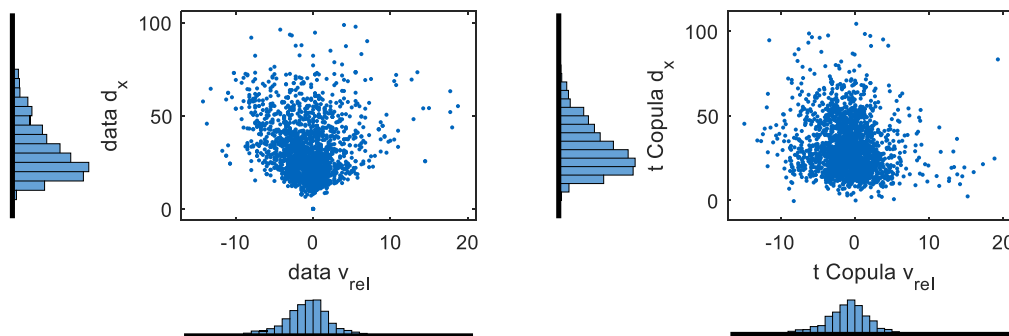


Abb. 6.8: (a) Scatterdarstellung mit Randverteilungen des Datensatzes der Parameter d_x und v_{rel}
(b) Von t-Copula Modellierung gezogene Parameterverteilung

Abschließend besteht auch noch die Möglichkeit, die Abhängigkeiten durch multivariate Diskretisierung vereinfacht abzubilden [121]. Durch Diskretisierung und Aufteilung der Daten können ggf. Bereiche identifiziert werden, in denen die Zufallsgrößen unabhängig angenommen werden können. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Modelle zur Abbildung von Parameterwahrscheinlichkeiten sind in die entwickelte Methodik integriert und können für die Berechnung von Risiken verwendet werden.

6.5 Berücksichtigung des Systemverhaltens

Neben der direkten Beeinflussung der Risikobewertung entstehen durch die Verhaltensmöglichkeiten und Fehlfunktionen des spezifizierten Systemverhaltens auch unterschiedliche Varianten der Szenarien. Bei der Risikobewertung müssen alle diese Varianten berücksichtigt werden.

6.5.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Verhaltensmöglichkeiten

Bevor die ermittelten Szenarien- und Parameterwahrscheinlichkeiten für die Risikobewertung verwendet werden, muss noch der Einfluss des definierten HAV-Verhaltens berücksichtigt werden. Einerseits können die relevanten Parameterbereiche durch die definierten Funktionsgrenzen eingeschränkt werden, andererseits können die unterschiedlichen Verhaltensmöglichkeiten $BehVar_i$ des HAV zu unterschiedlichen modifizierten Szenarien führen (Abschnitt 5.4.2). Diese müssen mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten gewichtet werden. Im einfachsten Fall sind die Wahrscheinlichkeiten der Verhaltensvarianten unabhängig von den Parameterverteilungen im Szenario. Dann können die Risiken der Szenarien mit den Wahrscheinlichkeiten der Varianten $\sum_i P(BehVar_i) = 1$ skaliert werden.

Sind die Wahrscheinlichkeiten der Verhaltensvarianten allerdings von den Szenariensparametern abhängig, ergeben sich für die modifizierten Szenarien auch modifizierte Parameterverteilungen. Je nach Modellierung der Szenariensparameter muss die Verhaltenswahrscheinlichkeit ebenfalls diskret $P(b = Be_j | p_{sc})$ oder kontinuierlich $f_{b=Be_j | p_{sc}}(p_{sc})$ definiert werden. Dadurch lassen sich sowohl die resultierenden Wahrscheinlichkeitsdichten der Szenariensparameter in den modifizierten Szenarien als auch die diskreten Wahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Verhaltensoptionen mit und ohne der Verhaltensweise, $P(Be_j | Sc_i)$ bzw. $P(\overline{Be_j} | Sc_i)$, berechnen. Im kontinuierlichen Fall ergibt sich

$$\begin{aligned}
 P(Be_j | Sc_i) &= \int f_{p_{sc}}(p_{sc}) f_{b=Be_j | p_{sc}}(p_{sc}) dp_{sc} \\
 P(\overline{Be_j} | Sc_i) &= 1 - P(Be_j | Sc_i) \\
 f_{p_{sc} | b=Be_j}(p_{sc}) &= \frac{f_{p_{sc}}(p_{sc}) f_{b=Be_j | p_{sc}}(p_{sc})}{P(Be_j | Sc_i)}
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

Dabei ist $f_{p_{sc}}(p_{sc})$ die Parameterverteilung im Ausgangsszenario. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 6.9 das Beispiel eines Einscherers dargestellt. Unter der Annahme, dass die Durchführung eines Ego-Fahrstreifenwechsels bei größeren Einscherabständen wahrscheinlicher ist, ergeben sich für die beiden Szenarienvarianten mit Ego-Fahrstreifenwechsel (FSW) und Ego-Bremung jeweils geänderte Verteilungen des Einscherabstands.

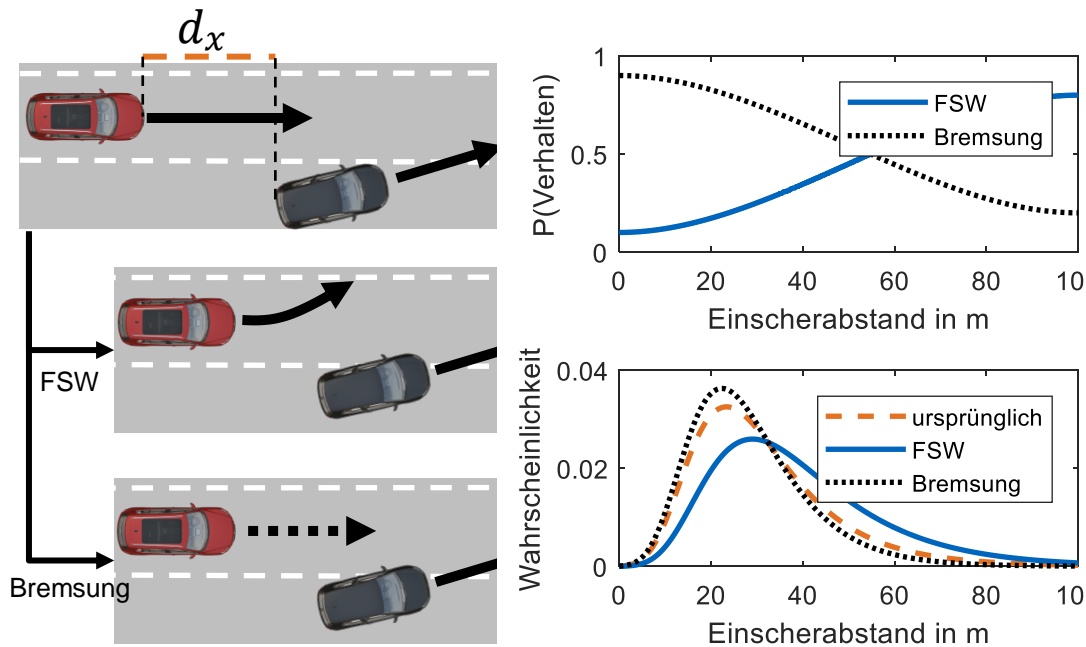


Abb. 6.9: Darstellung des Einflusses von Verhaltensvarianten auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Szenarienparametern

6.5.2 Berücksichtigung von Nominal- und Fehlverhalten

Nach Anforderung A_R5 soll das Nominal- und das Fehlverhalten berücksichtigt werden können. Deshalb müssen neben der Bewertung des Nominalverhaltens auch Fehler des Systems mit spezifizierten Fehlerraten bewertet werden. Damit ist die Ableitung von akzeptablen Fehlerraten für die entsprechenden Fehler möglich. Entscheidend ist dabei, dass Risikoanteile des Nominal- und des Fehlverhaltens unterscheidbar sind. Wie in Abschnitt 5.4.4 beschrieben, können parametrisches Fehlverhalten und falsche Verhaltensweisen modelliert werden.

Bei falschen Verhaltensweisen wird das Szenario zusätzlich zur Bewertung mit dem Nominalverhalten ein zweites Mal mit dem entsprechenden Fehlverhalten bewertet. Zur Berücksichtigung der Fehlerwahrscheinlichkeit muss bei der Risikoberechnung die Szenariowahrscheinlichkeit $P(sc_i)$ in Gl. (6.9) jeweils noch entsprechend gewichtet werden. Für den Nominalfall ergibt sich $P(sc_i)(1 - \sum_{j=1}^n P(Er_j))$ und bei der Fehlerberechnung $P(sc_i)P(Er_j)$. Dabei ist $P(Er_j)$ die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines von n Fehlverhalten. Aufgrund des gesuchten Erwartungswerts des Risikos kann diese durch die mittlere Fehlerrate λ_j beschrieben werden. Beispielsweise kann bei dem Einscherszenario eine, aufgrund einer fehlerhaften Situationsinterpretation, zu spät ausgeführte Verzögerung als Fehlverhalten modelliert werden.

Das parametrische Fehlverhalten wird dagegen innerhalb der Kollisionsmodelle berücksichtigt, weil diese ohnehin eine Abhängigkeit von den Systemparametern aufweisen. Die Integration in die Gesamtrisikoberechnung erfolgt wie bei den falschen Verhaltensweisen, nur dass hier die Kollisionswahrscheinlichkeit jeweils mit den Fehlerraten der parametrischen Fehlverhalten skaliert wird.

6.6 Modellierung der Kollisionswahrscheinlichkeit

Die Abschätzung und Modellierung der Kollisionswahrscheinlichkeit $P(C|sc)$ und der korrespondierenden Kollisionsparameterverteilungen $f(p_c|sc)$ ist ein entscheidender Bestandteil der Risikobewertung. Wie in Abb. 6.3 dargestellt, ist es der zentrale Modellbestandteil mit Schnittstellen zum Szenario, zu den Verhaltensweisen sowie den nachgelagerten Schadensfunktionen. Dementsprechend wird auch hier der relevante Konkretisierungslevel definiert und die Abhängigkeit von Systemverhalten abgebildet. Zur besseren Verständlichkeit wird im Folgenden der Aufbau von Kollisionsmodellen der unterschiedlichen CL anhand des Einschererbeispiels erläutert.

6.6.1 Identifikation und Abschätzung von Einflussfaktoren

Für eine aussagekräftige Risikobewertung müssen die relevantesten Einflussfaktoren auf Risiken identifiziert werden. Gerade bei der Neuentwicklung von komplexen Systemen stellt das eine Herausforderung dar. Durch die ermöglichte sukzessive Detaillierung können Einflussfaktoren sowohl systematisch als auch zufällig identifiziert und anschließend integriert werden. Demnach können unterschiedlichste Verfahren angewendet werden, um eine möglichst vollständige Abdeckung aller relevanten Risiken und Faktoren zu erhalten (Abschnitt 2.1.2). Für eine strukturierte Ableitung von Einflussfaktoren auf Basis von Expertenwissen wurden ausgehend von potenziellen Unfallkonstellationen durch ein Kausalkettenmodell mögliche Einflussgrößen identifiziert [156]. Für die sukzessive Detaillierung ist entscheidend, dass die jeweils identifizierten Einflussfaktoren sowie deren Relevanzbewertung nachvollziehbar dokumentiert sind, um neue Erkenntnisse aus Expertenwissen, Erfahrung während dem Projekt, aktuelle Unfalldaten etc. integrieren zu können.

6.6.2 Qualitative und semiquantitative Kollisionsmodellierung

Die Grundlage für die Abschätzung von Risiken in dieser Technik ist die automatische Zuordnung der Risikomodelle zu den entsprechenden Szenarienbeschreibungen. Demnach müssen die identifizierten Bedingungen und Einflussfaktoren der modellierten Risiken als Risikobedingungen modelliert werden. Im verwendeten Beispiel besteht die Risikobedingung demnach aus einem Einscherer vor dem Egofahrzeug.

Für eine erste Abschätzung und Einstufung des Risikos wird die Kollisionswahrscheinlichkeit $C \sim P(C|sc)$ in Anlehnung an den Stand der Technik wie in der ISO26262 [13] in vier Stufen von 0 bis 3 angegeben, die jeweils eine Größenordnung auseinanderliegen. Wird eine Fehlfunktion bewertet, so wird C wie die Beherrschbarkeit verwendet, womit auf diesem abstrakten Level Kompatibilität mit der Norm gewährleistet ist. Ebenso lässt sich die spezifizierte Nominalfunktion bewerten. Dementsprechend wird bei der Bewertung der fehlerfreien Spezifikation mit C die Kollisionsvermeidung durch die Funktion bezeichnet und die Restrisikorelevanz durch einen Automotive Performance Risk Level (APRL) beschrieben. Dieser wird analog zum ASIL berechnet. Damit kann grob bewertet werden, wie gut das aktuell betrachtete Szenario in seiner Worst-Case Ausprägung durch die spezifizierte Funktion beherrschbar ist. Der Fokus der späteren Detailierung wird dadurch auf kritische Bereiche gelenkt. In Anlehnung an die Norm [13, S. 10] wird C für die Bewertung der Nominalfunktion entsprechend von $C0$: „Kollision generell vermeidbar“ bis $C3$: „Kollision schwer oder nicht vermeidbar“ bewertet. Durch Ergänzung mit definierten Kollisionsraten könnte die qualitative

Bewertung in eine semiquantitative überführt werden. Allerdings erscheint dieser Schritt auf einer so abstrakten Bewertungsebene wenig zielführend. Zudem ist die Integration der für eine Quantifizierung benötigten Modelle direkt in die Methodik möglich.

Bei der manuellen Bewertung der Risikofaktoren sind auch die für die Bewertung berücksichtigten Verhaltensweisen explizit markiert. Damit lassen sich neben der automatischen Verknüpfung mögliche Auswirkungen von Spezifikationsänderungen detaillierter nachvollziehen. Neben der reinen Zuordnung lassen sich ab CL1 auch die qualitativen Einflüsse von Parameteränderungen mit Hilfe von z.B. Fuzzy-Logik modellieren. Beispielsweise können C und die Schadensschwere S in Abhängigkeit des Auslegungsparameters Systemlatenzzeit T_{sys} modelliert werden und damit bei Änderungen von T_{sys} die qualitativen Auswirkungen auf die Risikoeinschätzungen dargestellt werden.

6.6.3 Quantitative Modellierung von relevanten Zusammenhängen

Ausgehend von dem Wissen, dass es Kollisionen mit Einscherern geben kann, können die relevantesten Einflüsse sukzessive modelliert werden. Stark vereinfachend kann die Kritikalität von Einscherern auf Basis eines Längsdynamikmodells abgeschätzt werden. Unter Vernachlässigung der Querdynamik und dementsprechend möglichen Ausweichmanövern sowie der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit des Einscherers kann eine erste quantitative Abschätzung des Kollisionsrisikos und des relevanten Unfallparameters Kollisionsgeschwindigkeit modelliert werden (CL2). Die relevanten Eingangsparemeter des Szenarios sind demnach der Abstand d_x sowie die Relativgeschwindigkeit des Einscherers v_{rel} . Der entscheidende Einfluss der Funktion ist der Zeitpunkt sowie die Stärke einer Bremsreaktion auf das Einscherermanöver. Demnach wird für eine einfache Mindestspezifikation eine maximale Systemlatenzzeit T_{sys} im Modell integriert. Diese ist zwischen dem erstmaligen Überschreiten der Fahrstreifenmarkierung durch den Einscherer bis zum Anliegen der konstanten Bremsverzögerung a_{min} definiert. Diese Parameter sind demnach auch die Schnittstelle zu einem notwendigen Verhaltensmodell.

Eine solche vereinfachte Modellierung beinhaltet natürlich zahlreiche Annahmen und Vereinfachungen, die jeweils dokumentiert und begründet werden müssen (Anhang A.8). Diese können sukzessive in präziseren Modellen detailliert werden. Aufgrund des Umfangs ist ein solches schrittweises Vorgehen notwendig. Auf Basis der vereinfachten Modelle kann entschieden werden, welche Modelle und Aspekte zu detaillieren sind. Trotz der stark vereinfachten Modellierung ist bereits auf dieser Abstraktionsebene eine modellbasierte Bewertung der Systemauslegung möglich. In diesem Fall durch die beiden verhaltensbeschreibenden Parameter T_{sys} und a_{min} .

Durch die Detaillierung können zusätzlich überlagerte Verhaltensweisen berücksichtigt werden. Zur Reduktion der Risiken durch unaufmerksame und deutlich langsamere Einscherer wird beispielhaft zusätzlich spezifiziert, dass die Relativgeschwindigkeiten zu sämtlichen überholten Fahrzeugen durch geringe Verzögerungen a_{CA} auf 50 km/h reduziert werden sollen. Bei der Integration in die Längsdynamikberechnung wird die zusätzliche Worst-Case-Annahme getroffen, dass dadurch zwar die Relativgeschwindigkeit reduziert wird, die Einscherer aber im selben Abstand auftreten, also später als im ursprünglichen Szenario einscheren. Zur Veranschaulichung sind die Zustandsverläufe von Abstand, Relativgeschwindigkeit und Egobeschleunigung für eine exemplarische Szenarienparameterkombination in Abb. 6.10 dargestellt. Durch den frühzeitigen, geringen Bremseingriff kann bei diesem kritischen Einscherereignis die Kollisionsgeschwindigkeit von -17,6 m/s auf -10,9 m/s

reduziert werden. Entscheidend für den ganzheitlichen Bewertungsansatz der hier entwickelten Methodik ist, dass das hinzugefügte Verhaltensmodell nicht nur für Einschererszenarien oder das entsprechende Risikomodell gilt, sondern durch die eigenständige Modellierung auch in allen anderen Szenarien mit Fahrzeugen auf Nachbarfahrstreifen relevant wird.

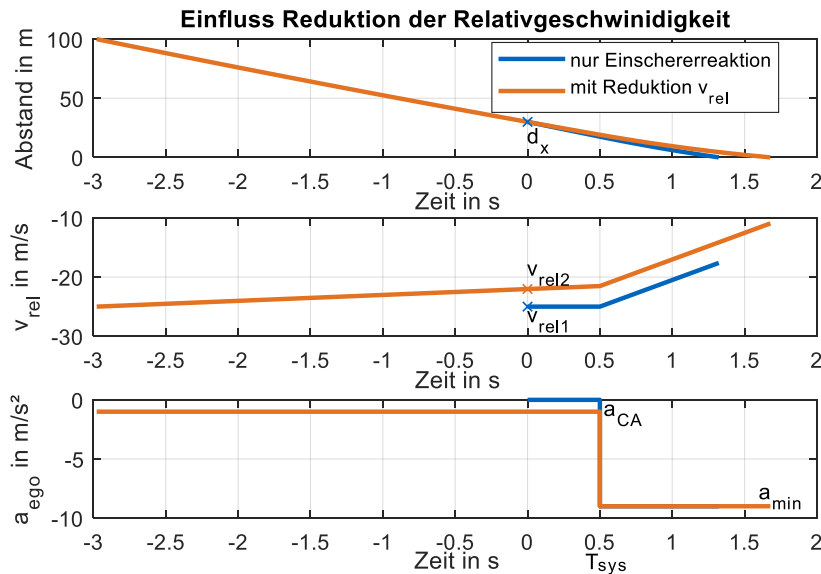


Abb. 6.10: Beispielergebnisse der Kollisionsmodellierung von Einscherern für eine Parameterkombination d_x, v_{rel} ohne und mit der zusätzlichen Verhaltensweise „Reduktion der Relativgeschwindigkeit“ mit den relevanten Verhaltensparametern T_{sys}, a_{min}, a_{CA}

Wie mit dem deterministischen Kollisionsmodell die gesuchte Kollisionswahrscheinlichkeit sowie die Kollisionsparameterverteilung bestimmt werden können, hängt von der Art der Parameterverteilung ab (Abschnitt 6.4.4). Sind diese nicht näher oder nur durch Histogramme spezifiziert, kann die Worst-Case-Grenze des jeweiligen Szenarienbereichs zur Modellberechnung verwendet und das Ergebnis mit der entsprechenden relativen Wahrscheinlichkeit gewichtet werden. Diese Berechnung ist sehr effizient, weil nur wenige Parameterkombinationen berechnet werden müssen. Allerdings hängt das Ergebnis stark von den gewählten Histogrammgrenzen ab und führt gegebenenfalls zu einer deutlichen Überschätzung des Risikos. So lange keine fundierten Aussagen über die Parameterverteilungen getroffen werden können, ist diese Art der Berechnung am zielführendsten.

Stehen die Parameter in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Verfügung, wird eine Monte-Carlo-Simulation verwendet. Bei einfachen Modellen, wie dem vorliegenden, konvergiert auch die direkte MC-Simulation ausreichend schnell. Für komplexere Risikomodelle gibt es zahlreiche Möglichkeiten die Effizienz der Berechnung durch Varianzreduktion zu steigern [157]. Zur Bestimmung der Versuchszahl von MC-Simulationen können entweder vor der Simulation Abschätzungen durchgeführt werden [158, S. 144] oder während der Laufzeit der aktuelle Fehler durch empirische Auswertung der bisherigen Ergebnisse geschätzt werden und bei Erreichen einer ausreichend geringen Fehlerschranke die Simulation beendet werden [157] (Anhang A.9).

Ist die parameterbasierte Repräsentation des Funktionsverhaltens nicht mehr ausreichend für die Risikoabschätzung, können auf dem Konkretisierungslevel CL3 beliebige Verhaltensmodelle in eine Risikosimulation integriert werden. Im vorliegenden Beispiel wird demnach die Längsdynamik des Einscherers sowie des Egofahrzeugs in Simulink modelliert und in Abhängigkeit der anliegenden Verzögerungen numerisch gelöst. Dadurch können unterschiedliche, zustandsabhängige Verhaltensweisen [60] in das Modell integriert werden,

solange die benötigte Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs ausgegeben wird. So wird im Beispiel die Erkennung von Einscherern in Abhängigkeit des Abstands unterschiedlich stark verrauscht. Die notwendige Verzögerung ergibt sich aus der Überlagerung einer Verzögerung zum Einhalten einer minimalen Zeitlücke sowie einer Verzögerung zur Abbildung des Annäherungsverhaltens inkl. jeweiliger Sicherheitsfaktoren [60, S. 366]. Die Umsetzung der Fahrzeugbewegung ist durch Aktoreschränkungen und Zeitverzögerungen abgebildet.

6.7 Schadens- und Verletzungsrisikofunktionen

Als letzter Term des Risikos muss die Schadensschwere modelliert werden. Eine Unterscheidung zwischen Kollisionen aufgrund von Fehlerfällen und Nominalverhalten wie bei der Kollisionswahrscheinlichkeit muss hierbei nicht getroffen werden. Für die Modellierung der Schadensschwere kann auf die umfangreichen Erkenntnisse aus dem Stand der Technik zurückgegriffen werden, wie an den folgenden Beispielen dargestellt.

Bei der abstrakten Risikoabschätzung auf den Stufen CL0 und CL1 wird die Schadenswahrscheinlichkeit $S \sim P(D|C, sc)$ analog zur Norm ISO26262 verwendet. Demnach werden die semiquantitativen Stufen S3, S2, S1 zur Modellierung von mehr als 10 % Wahrscheinlichkeit von Verletzungen der Stufen AIS 5-6, 3-6, 1-6 und ansonsten die Stufe S0 verwendet [13, S. 20]. Aufgrund der großen Relevanz dieser Einstufung gibt es zahlreiche Analysen von unterschiedlichen Unfalltypen und Ausprägungen bezüglich dieser Einstufung.

Für die in dieser Arbeit verwendete Verletzungsrisikofunktionen für Auffahrunfälle werden die für die logistische Regression

$$P(x) = \frac{e^z}{1 + e^z}; z = \beta_0 + \beta_1 x \quad (6.15)$$

notwendige Konstante β_0 und der Regressionskoeffizient β_1 aus der Abbildung in [34, S. 51] geschätzt (Abb. 6.11). Die Geschwindigkeitsänderung Δv wird durch den Impulssatz mit einer Worst-Case-Abschätzung der Masse des Kollisionsgegners sowie der Stoßzahl aus Tabelle 6.1 berechnet. Die durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Kosten [159] der einzelnen Schadenskategorien können zur Normierung herangezogen werden [144, S. 57] [1, S. 53] und damit aus allen Schadenswahrscheinlichkeiten aller Risikomodelle ein Gesamtrisiko berechnet werden.

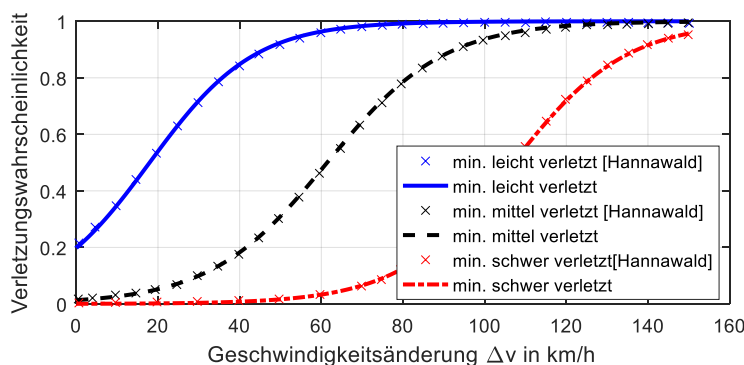


Abb. 6.11: Exemplarische Verletzungsrisikofunktion für Auffahrunfälle nach [34, S. 51], aus Abbildung extrahiert ($\beta_{0,lv} = -1.4$, $\beta_{1,lv} = 0.078$; $\beta_{0,mv} = -4.3$, $\beta_{1,mv} = 0.07$; $\beta_{0,sv} = -7.7$, $\beta_{1,sv} = 0.072$)

6.8 Bewertung der Risikomodellierung

Zur Bewertung der Anforderungserfüllung bei der Risikomodellierung wurden einige für den Anwendungsfall relevante Risiken modelliert und in die Technik integriert. Im Folgenden werden relevante Aspekte der Risikomodellierung anhand einiger Beispiele veranschaulicht, bevor die Anforderungen evaluiert und die Modellierung diskutiert werden.

6.8.1 Exemplarische Risikomodelle

Die entwickelte Technik zur Risikoabschätzung ermöglicht die Integration von unterschiedlichsten Risikomodellen. Es ist nicht das Ziel dieser Arbeit, eine vollständige Übersicht über alle auftretenden Risiken zu liefern, sondern eine Technik zu entwickeln, in die identifizierte Risiken sukzessive integriert werden können. Anhand von exemplarischen Risikomodellen für die betrachtete Beispielfunktion des Autobahnchauffeurs werden jeweils wichtige Aspekte veranschaulicht. Detailliertere Ausführungen finden sich im Anhang A.8 und in [121, 156].

Auffahrunfall auf verzögerndes Vorderfahrzeug

Ein entscheidender Aspekt bei der Abschätzung von Risiken ist der Einfluss des Ego-Verhaltens auf die Situationsausprägung. Zur genaueren Untersuchung der Frage, wie sich der Verkehr durch automatisierte Fahrzeuge ändern könnte, existiert das umfangreiche Forschungsprojekt L3Pilot [160]. Neben dem Gesamteinfluss bei einer großen Durchdringung hat aber auch jedes einzelne Fahrzeug einen entscheidenden Einfluss auf das Verkehrsgeschehen in unmittelbarer Umgebung, wodurch die Situationsausprägung auch vom spezifizierten System abhängt. Die Berücksichtigung solcher Effekte soll hier an dem einfachen Beispiel eines stark verzögernden Vorderfahrzeugs veranschaulicht werden. Das Szenario wird durch den Geschwindigkeitsabbau sowie die Dauer der Verzögerung beschrieben. Die Dynamik der Ausgangssituation, also die Zeitlücke T_g und die Relativgeschwindigkeit v_{rel} , in denen ein Vorderfahrzeug bremst, wird maßgeblich durch das Folgeverhalten des Ego-fahrzeugs beeinflusst. Um diesen Effekt bei der Risikoberechnung zu berücksichtigen, wird das Folgeverhalten des Ego-fahrzeugs probabilistisch spezifiziert. Durch die Spezifikation von maximalen Wahrscheinlichkeiten im Zustandsraum (v_{rel}, T_g) (Abb. 6.12(a)) können jeweils an den WorstCase-Punkten der einzelnen Wahrscheinlichkeitsfeldern die Risiken durch die erwarteten Szenarienparameterverteilungen (Abb. 6.12(b)) berechnet werden.

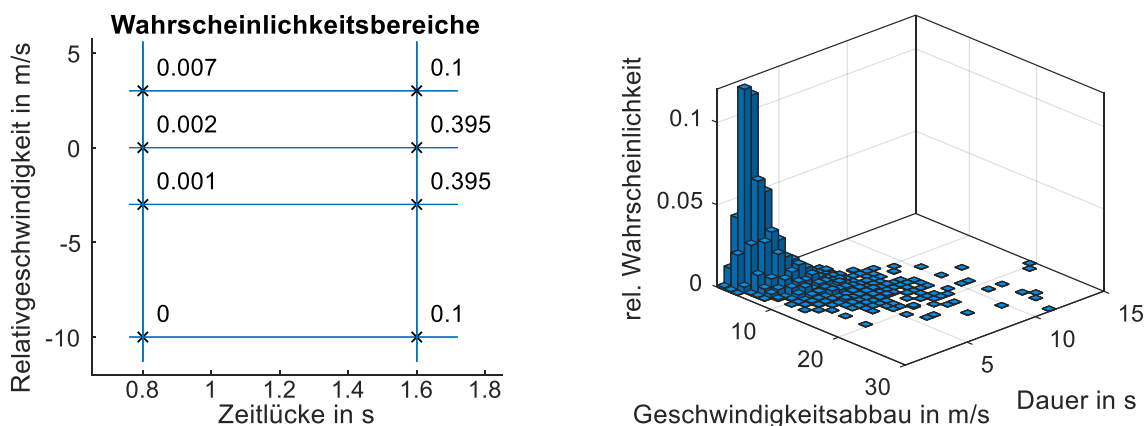


Abb. 6.12: Eingangsgrößen für die Risikoberechnung bei verzögernden Vorderfahrzeugen: (a) Spezifikation von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten des HAV in Zustandsbereichen der Folgefahrt und (b) deskriptive Statistik der relevanten Szenarienparameter

Auffahrunfall auf Einscherer

An dem in diesem Kapitel verwendeten Beispiel des Auffahrunfalls auf Einscherer kann die schrittweise Konkretisierung der Risikomodelle nachvollzogen werden (Abb. 6.13). Ausgangspunkt ist ein CL0 Risikomodell, das Szenarien mit Einschervorgängen vor dem Egofahrzeug zugeordnet wird und manuell bewertet werden muss. Um eine erste Abhängigkeit der Systemauslegung bei der Bewertung zu berücksichtigen, wird in einem konkretisierten Modell auf CL1 die Einstufung der Kollisionswahrscheinlichkeit durch Fuzzy Logic in Abhängigkeit von den relevanten Parametern der Systemlatenzzeit und Verzögerung modelliert. Ab dem Konkretisierungslevel CL2 sind unterschiedlichste Konkretisierungen denkbar. Exemplarisch wurde ausgehend von einem einfachen Längsdynamikmodell eine zusätzliche Verhaltensweise integriert. Zusätzlich wurde die Beschleunigung des Einscherers berücksichtigt, sowie auf CL3 eine zeitabhängige Simulation mit zustandsabhängigem Verhalten des Egofahrzeugs erstellt. Bei jeder dieser Konkretisierungen wird durch den Abdeckungsfaktor δ_{Ris} definiert, welcher Anteil der Risiken durch das konkretisierte Modell abgedeckt wird, um eine mehrfache Berücksichtigung in der Gesamtsumme zu verhindern.

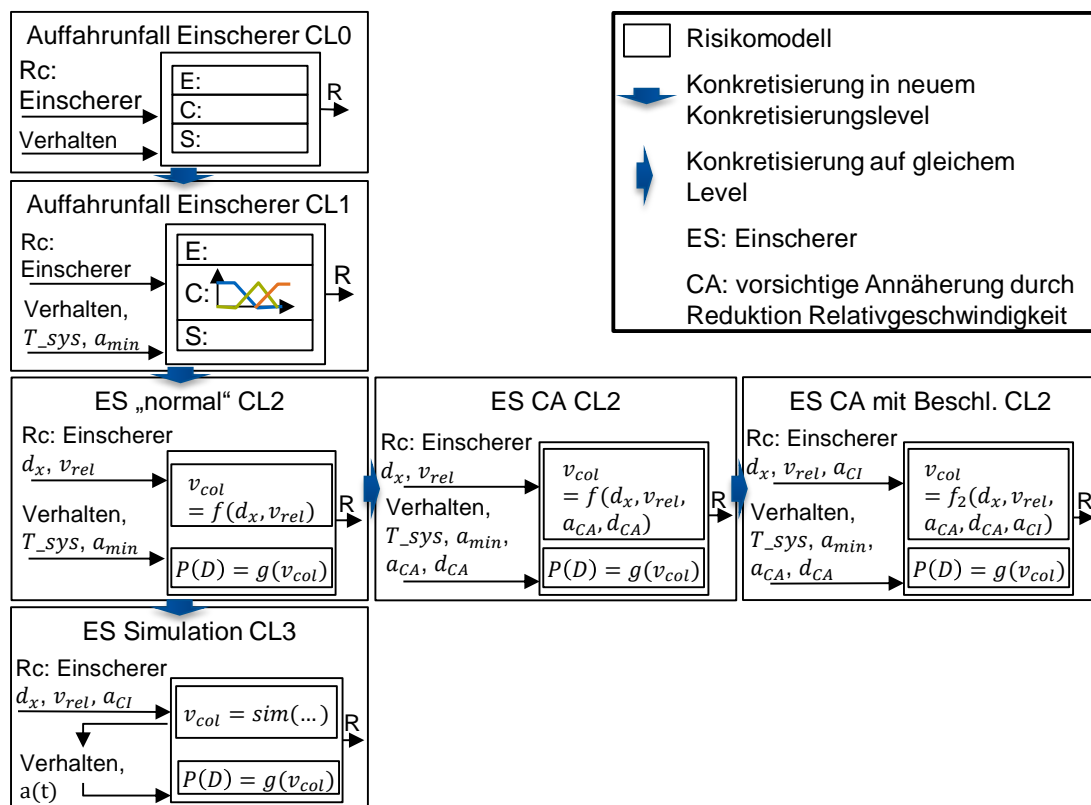


Abb. 6.13: Darstellung der schrittweisen Modellkonkretisierung für das Beispiel des Einschererrisikos

Zur Plausibilisierung der Modelle können, ausgehend von dem auf Bewegungsgleichungen basierenden, und damit leicht validierbarem Modell die Ergebnisse der abgeleiteten Modelle verglichen werden. Für den Vergleich wurden die wichtigsten zusätzlichen Parameter zu null gewählt und die resultierenden Kollisionsgeschwindigkeiten bei Abtastung des Szenarienszenariensparameterraums verglichen. Die einzigen Abweichungen ergeben sich im Simulationsmodell aufgrund der zusätzlich modellierten Wahrnehmungsungenauigkeiten. Neben dem numerischen Vergleich dient eine Visualisierung der Ergebnisse zur optischen Plausibilisierung (Abb. 6.14a). Im nächsten Schritt wird das Modellverhalten bei Anpassung der Parameter plausibilisiert. Exemplarisch sind die Ergebnisse von MonteCarlo-Simulationen der vier Modelle abgebildet (Abb. 6.14b). Auffällig ist einerseits die große Streuung durch die

probabilistische Berücksichtigung der Beschleunigung beim dritten Modell sowie die leicht erhöhten Kollisionsgeschwindigkeiten aufgrund der berücksichtigten Verzögerungsschwellzeit in der Simulation.

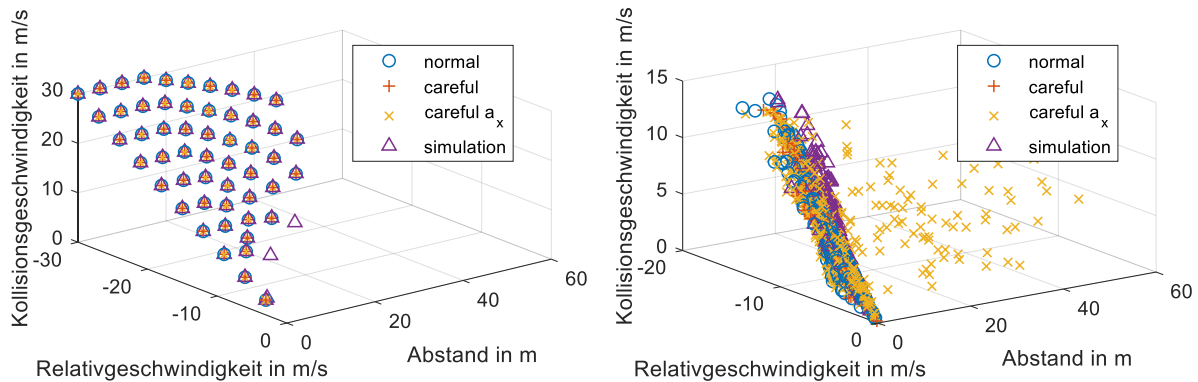


Abb. 6.14: (a) Plausibilisierung der Modellkonkretisierungen durch Abtastung des Wertebereichs mit angeglichenen Parametern und (b) Plausibilisierung der Ergebnisse der MC Simulation

Abkommen vom Fahrstreifen

Relevante Risiken werden durch das Zusammenwirken von Szenarien und Verhalten auf potenzielle Schäden identifiziert. Während die ersten beiden aufgeführten Beispiele ursprünglich durch ein Szenario motiviert sind, wird in diesem Beispiel dargestellt, wie Risiken ausgehend von einer Verhaltensweise identifiziert und konkretisiert werden. Wird die im Anwendungsfall Autobahnchauffeur größtenteils notwendige Verhaltensweise „Fahrstreifen halten“ nicht ausreichend umgesetzt, können mehrere Schäden verursacht werden. Durch das Abkommen vom Fahrstreifen können unter anderem Kollisionen mit Randbebauungen, statischen und dynamischen Objekten entstehen. Bei dynamischen Objekten sind jeweils Front-, Seiten- und Heckkollisionen möglich. Diese Risiken hängen alle davon ab, ob und wie das Egofahrzeug vom Fahrstreifen abweicht. Dieses potenzielle Abweichen muss entsprechend in Abhängigkeit von der Verhaltensspezifikation modelliert werden. Ausgehend von einem Risikomodell, das diese Risiken alle beinhaltet und ebenso allgemeine Risikobedingungen besitzt, können sukzessive Einzelmodelle für die spezifischen Risiken abgeleitet werden (Abb. 6.15).

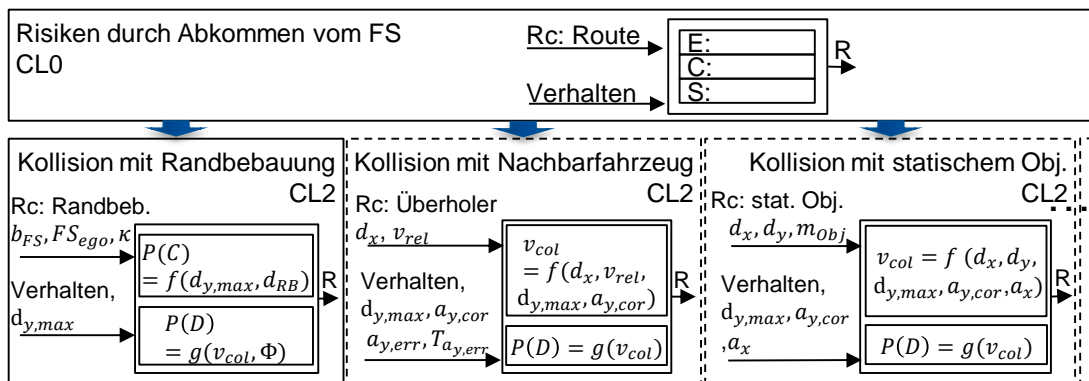


Abb. 6.15: Schematische Darstellung der Modellierung der Risiken durch Abkommen vom Fahrstreifen

Diese Einzelmodelle können ihrerseits wieder beliebig detailliert werden und benötigen dementsprechend unterschiedlich detaillierte Schnittstellen zur Verhaltensspezifikation. Während beispielsweise die Kollisionswahrscheinlichkeit mit Randbebauungen alleinig auf einer spezifizierten lateralen Toleranz denkbar ist, ist für die Bewertung von potenziellen Kollisionen mit Überholern die Querdynamik (Anhang A.7.2) von entscheidender Bedeutung.

Im Vergleich zu den anderen Beispielen führt das Risiko der Randbebauungskollision noch einen weiteren relevanten Aspekt bei der Risikobewertung ein. Dieses hängt nämlich nicht von der Auftretensrate, sondern von der Dauer einer bestimmten Szenarienkonstellation ab. Entsprechend wird für die Berechnung des Risikoerwartungswertes der zeitliche Anteil der Szenarienkonstellation verwendet.

6.8.2 Evaluation der Risikomodellierung

Für die Evaluation der Risikomodellierung wird bewertet, inwieweit die gestellten Anforderungen durch die entwickelte Risikomodellierung erfüllt werden. Durch die Unterteilung in die unterschiedlichen Konkretisierungslevel CL0 bis CL3 können von abstrakten Bewertungen bis zu detaillierten Simulationsmodellen unterschiedlich detaillierte Risikomodelle integriert werden (A_R1). Die Abbildung von qualitativen und semiquantitativen abstrakten Bewertungen ist durch den Konkretisierungslevel CL0 möglich (A_R3). Wie an dem Beispiel des Einscherers gezeigt, ist neben der Integration der unterschiedlichen Modelle auch eine schrittweise Detaillierung der Modelle möglich (Abb. 6.13), indem jeweils nur das konkreteste, passende Modell eines Risikos für die Berechnung verwendet wird (A_R4).

Die Abbildung von kausalen Zusammenhängen geschieht einerseits durch die Definition von Risikobedingungen und den Schnittstellen zur Verhaltensspezifikation. Dadurch wird für alle Konkretisierungslevel abstrakt modelliert, in welchen Szenarien diese auftreten können und welche Abhängigkeiten vom Systemverhalten modelliert sind. Andererseits können innerhalb der implementierten Risikomodelle ab Konkretisierungslevel CL1 beliebige kausale Zusammenhänge zwischen den entsprechenden Größen abgebildet werden. Die Abbildung von unscharfem Wissen und groben Annahmen kann sowohl durch eine entsprechende Abstraktion der Risikobedingungen als auch durch unscharfe Modellierungsmethoden wie z.B. Fuzzy-Logik integriert werden (A_R2).

Durch die Möglichkeit, beliebige Risikomodelle und Fehlermodelle in die Methodik zu integrieren und diese beliebig zu detaillieren, sind alle als relevant identifizierten Risiken und Risikoaspekte abbildbar (A_R5). Entscheidend ist dabei jedoch, dass die notwendigen Aspekte korrekt in den Risikobedingungen modelliert sind, um in allen relevanten Szenarien zugeordnet zu werden. Durch die Abbildung von Risikozusammenhängen in detaillierteren Modellen können auch im Rahmen der Detaillierung der Bewertungen Risikomodelle zusammengefasst werden.

Um die notwendige Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, können sämtliche Modellierungsaspekte der Methodik mit zugeordneten Begründungen versehen werden. Innerhalb der Risikomodelle getroffene Annahmen und Argumentationsketten, wie exemplarisch in Tabelle A.8.4 dargestellt, werden direkt innerhalb der Modelle definiert und bei allen Berechnungen dokumentiert (A_R6).

Aufgrund der fehlenden Daten von aufgetretenen Schäden können als Referenzen für prospektive Risikomodelle lediglich standardisierte Modelle oder Expertenwissen herangezogen werden [7, S. 206]. So vergleicht Ständer die Ergebnisse seines Ansatzes beispielsweise mit der Modellierung durch einem Ereignisbaum [42, S. 148]. Ein solcher Vergleich setzt allerdings eine vergleichbare Modellierung voraus. Demnach ist die kritische Überprüfung und Plausibilisierung der Modellierung und Ergebnisse durch Experten ein entscheidender Bestandteil jeder Risikobewertung. Grundlage dafür ist die nachvollziehbare Dokumentation aller Annahmen und Modellierungsschritte. Exemplarisch sind relevante Annahmen für die hier dargestellten Risikomodelle im Anhang A.8 gelistet. Da vor allem eine Unterschätzung des

Risikos kritisch ist, können vorhandene Unsicherheiten durch konservative Abschätzungen abgedeckt werden. Durch die schrittweise Detaillierung der Modelle können diese Unsicherheiten dann sukzessive reduziert werden.

Die Plausibilisierung der Risikomodelle muss für jedes Risikomodell einzeln durchgeführt werden und unterscheidet sich je nach Konkretisierungslevel des Modells. Auf den abstrakten Ebenen CL0 und CL1 können die Modelle mittels Prüfung durch Experten plausibilisiert werden [161, S. 17] [13, S. 11]. Sobald die Risikomodelle konkrete Modellierungen von Zusammenhängen enthalten, können diese Modellbestandteile zusätzlich durch Analyse des Modellverhaltens plausibilisiert werden. Je nach Komplexität der Modelle und modellierten Aspekte ist auch eine teilweise Validierung denkbar. Im vorliegenden Beispiel des Einschererrisikos wird die Plausibilität der Risikomodelle durch Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen, konkretisierten Modelle geprüft. Dafür werden die Modelle sowohl mit angeglichenen Parametern als auch mit aktiven Modellerweiterungen gerechnet und die Unterschiede plausibilisiert. Ausgehend von einem auf einfachen Bewegungsgleichungen basierenden Modell können damit die komplexeren Modelle plausibilisiert werden. Liegen für Teilmodelle wie beispielsweise die Verletzungsrisikofunktionen Referenzwerte vor, können diese direkt validiert werden (A_R7).

6.8.3 Diskussion der Risikomodellierung

Ein generelles Problem bei der Risikomodellierung ist die Vielzahl der Unsicherheiten und dafür zu treffenden Annahmen. Beginnend bei der Wahrscheinlichkeit der Szenarien fehlen in vielen Fällen ausreichende Datensätze, um statistisch fundierte Aussagen treffen zu können. Diese Problematik verschärft sich noch, wenn die Szenarien immer detaillierter definiert werden oder die Verteilungen von charakteristischen und voneinander abhängigen Szenarienparametern abgeschätzt werden sollen. Diese Problematik gilt aber generell für Risikoabschätzungen. Das gängige Mittel bei fehlender Datenbasis ist die Verwendung von begründeten Annahmen. Die hier entwickelte Technik ermöglicht durch die automatisierte Bewertung sukzessive getroffene Annahmen auf Basis von fundierten Statistiken anzupassen und die Auswirkungen direkt zu ermitteln. Das vorgestellte Konzept zur Szenarienauswertung dient zur entwicklungsbegleitenden Präzisierung der Wahrscheinlichkeitsannahmen durch Ergänzung von Auswertungen von benötigten spezifischen Szenarienkonstellationen sowie der sukzessiven Vergrößerung der ausgewerteten Datenbasis. Dabei muss zusätzlich noch berücksichtigt werden, dass sich die Wahrscheinlichkeiten von Szenarien in unterschiedlichen Märkten massiv unterscheiden können und auch die Funktionsweise von HAV zu einer Veränderung der Wahrscheinlichkeiten führen kann.

Die Erstellung der Risikomodelle basiert auf einer Vielzahl von Annahmen. Werden diese teilweise durch detailliertere Modelle ersetzt, werden dafür in den meisten Fällen detailliertere Eingangsdaten benötigt, die dann ggf. wieder nur durch Annahmen abgeschätzt werden können. Dementsprechend ist die Wahl von sinnvollen Abstraktionsebenen bei der Modellierung von Risiken sowohl von dem Wissen über relevante Zusammenhänge als auch von der Zugänglichkeit von benötigten Eingangsdaten abhängig.

Mit dem vorgestellten Vorgehen zur Risikomodellierung lassen sich alle relevanten Teilaspekte einer modellbasierten Risikoabschätzung in die Technik integrieren und die gestellten Anforderungen erfüllen. Die offenen Punkte bezüglich der Validierung sowie der Vielzahl der Annahmen gelten generell für prospektive Risikoabschätzungen und sind nicht durch die entwickelte Technik verursacht.

7 Ergebnisse und Validierung

Gesamtmodell

Der Kernaspekt dieser Risikobewertungstechnik ist die getrennte Modellierbarkeit und Interpretation von Szenarien, Verhalten und Risiken sowie die automatisierte Verknüpfung auf Basis von Szenarienbedingungen. Da die entwickelten Modellierungen dieser drei Aspekte die Interaktion berücksichtigt und benötigt, werden in den Bewertungskapiteln 4.5, 5.5 und 6.8 bereits zahlreiche Ergebnisse der Modellinteraktionen dargestellt und bewertet. Dennoch sollen in diesem Kapitel explizit die Möglichkeiten und Einschränkungen des Gesamtmodells dargestellt werden.

7.1 Zusammenfügen der Modellbestandteile

In Abschnitt 3.2 ist das Konzept zum Zusammenfügen der Szenarien, Verhaltensweisen und Risikomodelle beschrieben. Um das Zusammenfügen zu ermöglichen, wird diesen Modellen jeweils ein Bereich im Szenarienraum zugeordnet. Dadurch können durch eine Ähnlichkeitssuche auf dem Szenarienraum für jedes Szenario die relevanten Verhaltensweisen und Risiken identifiziert werden. Dass der entwickelte Szenarienraum und die zugehörige Szenariensuche die notwendige Verknüpfung der Modellbestandteile ermöglicht, wird in Kap. 4.5 gezeigt. Die korrekte Zuordnung der Verhaltensweisen zu den Szenarien wird für die Funktionsgrenzen und die Verhaltensmodelle für alle modellierten Szenarien durch manuelle Validierung gezeigt (Abschnitt 5.5). Die Verknüpfung mit den Risikomodellen basiert auf dem gleichen Prinzip und ist die notwendige Voraussetzung für die in Kapitel 6 dargestellten Ergebnisse.

Neben der Verknüpfung mit den zu bewertenden Szenarien ist auch eine eindeutige Zuordnung von Verhaltensweisen zu Risiken für eine ganzheitliche Problemmodellierung notwendig. Das gilt zumindest für die getrennte Bewertung der einzelnen Risiken auf höheren Abstraktionsebenen, wenn nicht alle Verhaltensweisen in einem einheitlichen Verhaltensspielraum zusammengefasst werden. Bei der manuellen Bewertung auf CL0 werden deshalb die bei der Risikobewertung relevanten und berücksichtigten Verhaltensweisen aus allen zugeordneten manuell ausgewählt. Bei der automatisierten Bewertung auf CL1 bis CL3 werden die Verhaltensweisen und Risiken abhängig von deren jeweiligen Szenarienbedingungen (B_c , R_c) zueinander zugeordnet.

Zur Veranschaulichung der Gesamtmodellierung sind alle exemplarisch umgesetzten Modellaspekte und deren Verbindungen in Abb. 7.1 dargestellt. In der Graphendarstellung sind die automatisch durch die Ähnlichkeitssuche zwischen Szenarien und Szenarienbedingungen gezogenen Verknüpfungen in blau hervorgehoben. Von den 8633 in diesem Beispiel vorhandenen Verbindungen sind 7726 durch die Suche automatisch generiert. Weitere 191 ergeben sich aus der automatischen Zuordnung zwischen Risiken und Verhalten und 351

durch die automatische Generierung von mit Ego-Verhaltensweisen modifizierten Originalszenarien. Die verbleibenden 365 Verknüpfungen müssen im Rahmen der Modellierung erstellt werden und repräsentieren die Hierarchie zwischen den Modellen sowie die zugeordneten Szenarienbedingungen.

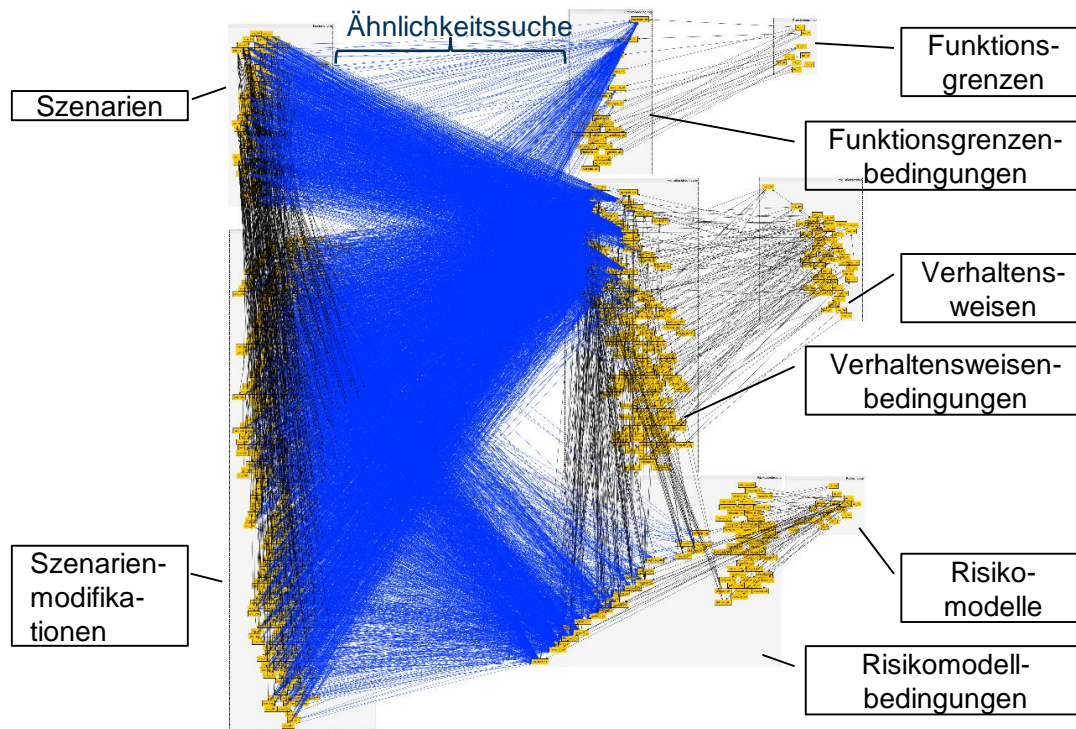


Abb. 7.1: Darstellung der exemplarischen Modellbestandteile, der manuell erstellten Verknüpfungen zwischen Modellen und Bedingungen (schwarz) sowie die automatisiert generierten Verknüpfungen durch die Ähnlichkeitssuche (blau, Beschriftung Ähnlichkeitssuche)

Bei dem Zusammenfügen der quantitativen Bewertungen der einzelnen Risikomodelle müssen potenzielle Überschneidungen der Szenarien und der Risikomodelle aufgrund der Konkretisierungen und Spezialisierungen berücksichtigt werden. Damit diese Überschneidungen in der Gesamtbewertung nicht mehrfach einfließen, werden diese durch die Abdeckungsfaktoren δ_{sc} und δ_{Ris} herausgerechnet (Anhang A.10). Die Überschneidung der Szenarien δ_{sc} ergibt sich durch das Verhältnis der jeweiligen Risikoanteile in diesem Szenario. Die Überschneidungen von konkretisierten Risikomodellen δ_{Ris} wird dagegen direkt bei der Konkretisierung definiert. Da dieser Anteil der Risikoabdeckung jedoch von den bewerteten Szenarien abhängen kann, ist nur eine komplette Konkretisierung eines Modells durch ein oder mehrere Konkretisierungen allgemeingültig. Dagegen kann das Ergebnis eines spezialisierteren Risikomodells immer als vollständiger Ersatz des größeren Modells interpretiert werden.

7.2 Ergebnisse

Auf dem abstrakten Konkretisierungslevel CL0 bestehen die Ergebnisse aus den Expertenbewertungen und Begründungen der analog zur ISO 26262-3 gewählten Parametern S, E und C. Da die Technik die Bewertung des Risikos der spezifizierten Funktion und von Fehlverhalten ermöglicht, werden neben den ASIL für Fehlverhalten auch APRL zur qualitativen Einschätzung des Risikos der Systemleistungsfähigkeit definiert. Der einzige

Unterschied besteht in der Verwendung des Faktors C, der in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit der Beherrschbarkeit durch das HAV darstellt. Zur Bewertung von Fehlverhalten kann dies explizit jeweils als eigene, alternative Verhaltensweise zur korrekten Version erstellt werden. Beispielsweise ist eine Verhaltensweise, die ein fehlerhaftes, maximales Einlenken abbildet, als Alternative für Fahrstreifenfolgen modelliert.

Für die initiale Parametrierung des Systems ergibt sich für die erstellten Risikomodelle exemplarisch ein Gesamtrisiko von 9,7 €/h wenn die einzelnen Schadenskategorien mit Hilfe der volkswirtschaftlichen Kosten zusammen gefasst werden (Kap. 6.7). Durch Analyse der jeweils größten Beiträge kann das Risiko des Gesamtsystem zielgerichtet reduziert werden. Im vorliegenden Beispiel sind die hohen Risikowerte durch die aus SHRP2 ermittelten Naheinscherer aus langsamen Kolonnen verursacht. Zur Reduktion des Risikos wurde die Verhaltensweise zur Reduktion der Relativgeschwindigkeit (Abschnitt 6.6.3) mit $a_{CA} = -2 \text{ m/s}^2$ ab 120 m Abstand ergänzt. Die entwickelte Methodik erlaubt nun die Auswirkung von Verhaltensänderungen auf das Gesamtrisiko und die Einflüsse der Einzelrisiken abzuschätzen (Abb. 7.2). Die hohen Risiken aufgrund nicht spezifizierter Werte bzw. Wahrscheinlichkeiten, die mit Worst-Case-Werten belegt werden, sind der Übersichtlichkeit halber in der Abbildung ausgeblendet. Durch die sukzessive Analyse der höchsten Risikobeiträge kann so iterativ eine vollständige Bewertung und eine risikooptimierte Systemauslegung erreicht werden.

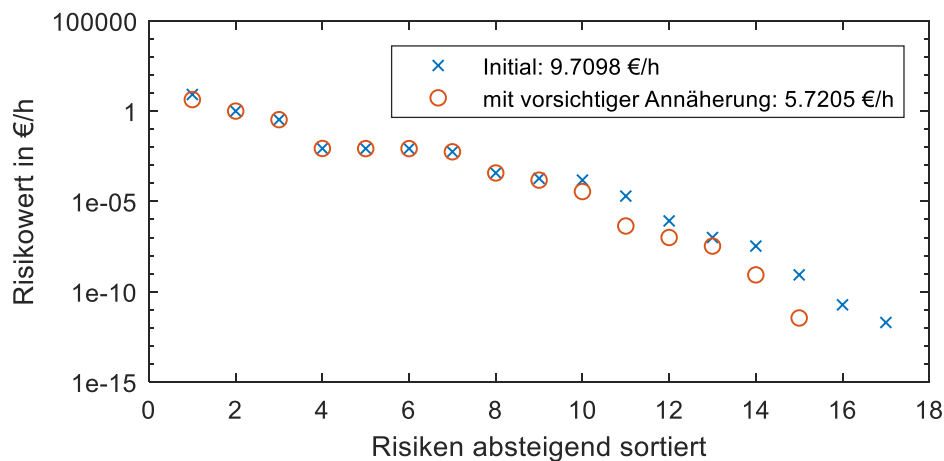


Abb. 7.2: Exemplarische Darstellung einer Risikoreduktion durch Hinzufügen einer Verhaltensweise

7.3 Validierung

Diese Arbeit umfasst sowohl eine Technik zur Risikobewertung als auch integrierte Risikomodelle. Um die Ergebnisse für eine Systemauslegung nutzen zu können, müssen sowohl die Technik als auch die Modelle validiert werden. Auf die Möglichkeiten zur Validierung der Modelle wird in Kapitel 6 eingegangen. Zur Validierung von Risikobewertungstechniken werden in der Literatur Vergleiche mit bestehenden Techniken, argumentative Begründung der Anforderungserfüllung sowie Anwendungen auf Beispielfälle verwendet [14, 42]. Da es nach dem aktuellen Kenntnisstand des Autors keine vergleichbare Technik zur Verknüpfung und sukzessiven Detaillierung der Risikobewertung gibt, wird im Folgenden die Erfüllung der definierten Anforderungen bewertet. Angelehnt an das Validierungsvorgehen von Bepperling [14, S. 137] wird die Erfüllung der Anforderungen (Abschnitt 1.2) argumentativ gezeigt und anhand von Beispielen plausibilisiert.

A1: Abstrakte und Qualitative Bewertungen

Durch die Einführung des Konkretisierungslevels 0 für die Verhaltens- und Risikomodelle sowie den freien Abstraktionsgrad der Szenarien können abstrakte, qualitative Bewertungen modelliert werden. Durch Hinzufügen quantitativer Begründungen können diese auch in semiquantitative Bewertungen überführt werden.

A2: Präzisierung von bestehenden Bewertungen

Die Abdeckung der unterschiedlichen Abstraktionslevel von Risikobewertungen wird in dieser Arbeit anhand des Einschernerbeispiels von einer groben Identifikation des Risikos bis zu detaillierten, begründeten quantitativen Risikomodelle gezeigt (Kap. 6.8.1). Entscheidend ist dabei die schrittweise Detaillierung der Modelle auf den unterschiedlichen Ebenen durch Berücksichtigung und begründete Anpassung der bisherigen Annahmen. Durch die eingeführten Abdeckungsfaktoren (Anhang A.10) ist dennoch eine Gesamtbewertung möglich.

A3: Automatische Bewertung der aktuellen Funktionsdefinition

Durch die Abhängigkeiten der Risikobewertung von der Funktionsspezifikation auf den Konkretisierungsleveln 1-3 wird eine automatische Bewertung der aktuell modellierten Funktionsdefinition durch die Technik ermöglicht. Entscheidend ist dabei, dass nicht die Funktion als solche, sondern die Funktionsspezifikation modelliert und bewertet wird. Durch das in Kapitel 5 beschriebene Konzept zur Funktionsmodellierung können vielfältige Verhaltensanforderungen definiert werden. Zur Veranschaulichung ist das Ergebnis einer komplexen Spezifikationsänderung durch Hinzufügen einer neuen Verhaltensweise beschrieben (Kap. 7.2).

A4: Modellierung von Risiken durch begrenzte Leistungsfähigkeit sowie Fehler

Risikobewertungen streben grundsätzlich die vollständige Bewertung aller Risiken an. Allerdings ist bei komplexen Problemstellungen Vollständigkeit nur auf abstrakten Ebenen zu erreichen. Mathematisch kann die Vollständigkeit durch Hinzufügen einer zusätzlichen Kategorie „andere“ abgebildet werden [17, S. 15]. Durch die Abstraktionsmöglichkeiten der Risikobewertung wird das Erreichen von Vollständigkeit auf abstrakter Ebene unterstützt. Die dabei identifizierten relevanten Risiken können anschließend detailliert werden und damit auch quantitative Risikobewertungen des Nominalverhaltens und von Fehlerfällen abgebildet werden. Durch die Abbildbarkeit von Risiken durch einzelne Risikomodelle können beliebige Risiken hinzugefügt werden, wodurch die Technik einer vollständigen Risikobewertung nicht entgegensteht. Die Anwendbarkeit wurde durch Betrachtung mehrerer Anwendungsbeispiele (Kap. 6.8) gezeigt.

A5: Kompatibilität mit bestehenden Methoden und Normen

Die entwickelte Technik basiert auf den im Stand der Wissenschaft und Technik vorgestellten Methoden und Normen (Kap. 2). Darüber hinaus wurde explizit die Erfüllung aller Anforderungen der ISO 26262-3 [13] geprüft. Da die Technik ohnehin auf Fahrzeugebene angewendet wird und die gleichen Bewertungskriterien auf der CL0 verwendet, werden bei korrekter Anwendung der Technik alle Anforderungen der Norm an die Risikobewertung erfüllt.

A6: Ansätze zur Beherrschung der Szenarienvielfalt

Die Technik nutzt die Prinzipien der Formalisierung, der Dekomposition und der Abstraktion, um die Vielfalt beschreibbar zu machen. Durch die Dekomposition von Verhaltensweisen, Risikomodelle und Szenarien müssen nicht alle Kombinationen dieser drei Aspekte explizit modelliert und bewertet werden, sondern lassen sich automatisiert auswerten. Durch die

Abstraktion können diese drei Aspekte jeweils auf einer höheren Ebene vollständig beschrieben und nur in den relevanten Bereichen sukzessive detailliert werden. Um sämtliche Spezialfälle ebenfalls abdecken zu können, ist die verwendete Szenariensprache erweiterbar ausgelegt.

A7: Nachvollziehbarkeit der Bewertungen

Für alle manuellen Bewertungen auf CL0 ist wie bei den klassischen Methoden eine ausreichende Begründung durch die bewertenden Experten unerlässlich. Auf den quantitativen Ebenen erfolgt die Begründung durch die implementierten Modelle sowie durch eine ausreichende Dokumentation und Begründung der getroffenen Annahmen.

A8: Plausibilität der Bewertungen

Die Plausibilität der Bewertungen ist ein entscheidender Faktor für die Nutzbarkeit von Risikobewertungen. Die Plausibilität der gezeigten Beispiele ist nicht der Fokus dieser Arbeit, wird aber dennoch in den einzelnen Kapiteln begründet. Die Plausibilität der Gesamtbewertung nach Zusammenfügen der Modellbestandteile ergibt sich aus der Plausibilität der korrekten Verknüpfung der Modelle.

A9: Erweiterbare und wartbare Wissensbasis

Durch die getrennte Modellierung von Szenarien, Verhaltensweisen und Risikomodellen und die weitestgehend automatisierte Bewertung der relevanten Kombinationen können mit der vorliegenden Technik effizient Änderungen an den Bewertungsbestandteilen vorgenommen werden. Erweiterungen und Anpassungen müssen jeweils nur an dem zu ändernden Teilaspekt durchgeführt werden und nicht an allen damit interagierenden Szenarien, Verhaltensweisen oder Risikomodellen. Damit ermöglicht die Technik das sukzessive Aufbauen und Detaillieren einer Wissensbasis, die auch für unterschiedliche Funktionen verwendet werden kann.

7.4 Diskussion

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Technik zur Risikobewertung stellt einen innovativen Ansatz zum Umgang mit der Szenarienvielfalt beim automatisierten Fahren dar. Die an die Technik gestellten Anforderungen werden nach Einschätzung des Autors erfüllt. Dennoch gibt es zahlreiche relevante Einschränkungen, die hier diskutiert werden.

Die Modellierung im Szenarienraum erlaubt unzählige Freiheitsgrade, um die benötigte Vielfalt abdecken zu können. Dadurch können jedoch ähnliche Szenarien unterschiedlich modelliert werden, was eine direkte automatische Zuordnung verhindert. Der strukturierte Aufbau der Szenarienbeschreibungssprache soll diesem Problem entgegenwirken. Darüber hinaus wird bei der Modellierung durch unterschiedliche Anwender, z.B. auch durch automatische Szenarienerstellung aus Messdaten, die Verwendung von Modellierungsrichtlinien unerlässlich sein. Außerdem kann die explizite Berücksichtigung von häufigen Mehrdeutigkeiten in der Ähnlichkeitssuche die Robustheit der Verknüpfung erhöhen.

Diese Problematik ergibt sich konsequenterweise nicht nur bei der Szenarienmodellierung, sondern analog bei der Modellierung der Szenarienbedingungen der unterschiedlichen Modelle. Dabei müssen alle unterschiedlichen Modellierungsmöglichkeiten der Beschreibungssprache berücksichtigt werden, damit das entsprechende Modell zu allen relevanten Szenarien zugeordnet werden kann. Solche fehlenden Bedingungen können zu einer

Verfälschung der Bewertung führen. Durch die Modellierung von abstrakten Modellen und deren Bedingungen, können Szenarien mit fehlender Zuordnung zu adäquaten Modellen jedoch automatisiert erkannt werden. Die Bedingungen der Modelle lassen sich entsprechend sukzessive ergänzen. Dadurch ist auch sichergestellt, dass die Bedingungen der Modelle explizit modelliert sind und damit keine risikorelevanten Spezifikationslücken verbleiben.

Diese automatisierte Erkennung ergibt sich aus der Notwendigkeit, dass die jeweils zugeordneten Modelle kompatible Schnittstellen zueinander aufweisen müssen. Dadurch lassen sich Inkonsistenzen in der Zuordnung oder noch fehlende Detaillierungen von Modellen identifizieren. Andererseits müssen bei der Detaillierung von einzelnen Modellen ggf. auch die korrespondierenden Modelle angepasst werden, wenn die Detaillierung auch die Schnittstellen umfasst. Beispielsweise ist bei der in Abb. 6.13 dargestellten Detaillierung der Risikomodelle auch die Detaillierung der entsprechenden Verhaltensmodelle zur Befüllung der Verhalten-Risikoschnittstelle notwendig. Gerade bei sehr abstrakten und deshalb aufeinander abgestimmten Modellierungen ergibt sich so eine Abhängigkeit zwischen den Verhaltens- und Risikomodelle. Eine ähnliche Abhängigkeit ergibt sich dabei zu den Szenarien. Für die quantitativen Risikobewertungen müssen die Szenarien die Wahrscheinlichkeitsmodelle für die benötigten Parameter enthalten (Abschnitt 6.4).

Neben der komplexen Szenarien- und Bedingungsmodellierung im Szenarienraum stellt auch die Ähnlichkeitssuche eine potenzielle Fehlerquelle der Technik dar. Die Ähnlichkeitssuche wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, in Kapitel 4 formal beschrieben und für einen Machbarkeitsnachweis prototypisch umgesetzt. Die umgesetzte Implementierung wurde anhand von zahlreichen Beispielszenarien und Verknüpfungen (Abb. 7.1) plausibilisiert und validiert. Aufgrund der unzähligen Freiheitsgrade der Szenarienbeschreibung sind jedoch bisher nicht aufgetretene Spezialfälle und Kombinationen nicht implementiert oder getestet, weshalb die Ähnlichkeitssuche bei der umfangreichen Anwendung der Technik auch weiter detailliert werden muss.

Die hier präsentierte Technik soll während der Entwicklung zu einer risikooptimierten Systemspezifikation beitragen. Dafür sind vor allem die Einzelbeiträge von Verhaltensweisen zu Risiken in den Szenarien relevant. Die Technik soll dabei vor allem auch die detaillierte Analyse der Zusammenhänge und Ursachen unterstützen. Das dabei abgeleitete Gesamtrisiko ist nur bedingt aussagekräftig, weil die Abschätzung der vorgestellten Abdeckungsfaktoren zusätzlich zu den Modellgenauigkeiten mit Unsicherheiten verbunden ist.

Für die Integration der hier präsentierten Technik in den Entwicklungsprozess ist eine Durchgängigkeit gefordert [7, S. 28], die im Idealfall sowohl die Szenarien als auch die Verhaltensspezifikation umfasst. Da die hier verwendeten Szenarien bereits bei sehr abstrakten Formulierungen starten und die Sprache menschlich interpretierbar und damit auf Prüfgeländen ausführbar ist, muss lediglich am detaillierten Ende der Bewertung eine Verknüpfung mit einem Simulationsformat implementiert werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Modellierung der Szenarien und Bedingungen ist die zeitliche Ausdehnung sowie die Anzahl von Verhaltensentscheidungen innerhalb eines Szenarios. Die hier präsentierte Zuordnung von Verhaltensweisen erlaubt die Modellierung von unterschiedlichen Verhaltensoptionen. Jedoch wird die notwendige Beschreibung von langen Szenarien, die alle relevanten Informationen für mehrere aufeinanderfolgende Verhaltensoptionen enthalten, schnell komplex und unübersichtlich. Für die Modellierung von langen Szenarienabläufen und dem durchgängigen Verhalten des Systems ist die Verknüpfung mit einer Gesamtsimulation inkl. des implementierten Systems zielführender.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Bei der Entwicklung von sicherheitsrelevanten Systemen ist eine Risikobewertung notwendig. Beim hochautomatisierten Fahren ergibt sich dabei die Herausforderung, dass ein hochkomplexes System aus Verkehrsumfeld und Fahrzeug betrachtet werden muss und Risiken häufig von detaillierten Aspekten abhängen. Im Stand der Wissenschaft gibt es zahlreiche Methoden und Techniken, die jeweils Teile der Anforderungen an diese Risikobewertung erfüllen. Jedoch fehlen praktikable Lösungen für den Umgang mit der Szenarienvielfalt und der sukzessiven Weiterentwicklung sowohl der Bewertung als auch der Funktionsdefinition. Um die daraus resultierende Komplexität und Vielfalt beherrschen zu können, wird in dieser Arbeit eine Technik zur modellbasierten Risikobewertung entwickelt.

Die Technik basiert auf einem entwickelten formalen Beschreibungsmittel, um Szenarien, die Funktionsspezifikation, die Risiken und deren Zusammenhänge modellieren zu können. Ein standardisiertes Vorgehen zur methodischen Modellbildung strukturiert dabei die notwendige Modellbildung. Ein formaler Szenarienraum bildet die komplexen Verknüpfungen zwischen den einzelnen Modellaspekten ab. Um eine unabhängige Modellierung der Bestandteile zu ermöglichen, werden die Verknüpfungen nicht statisch gezogen, sondern durch eine automatisierte Ähnlichkeitssuche auf dem Szenarienraum generiert. Die Modellierung nutzt mehrere Dimensionen von Abstraktionsebenen, um die Komplexität und Vielfalt beherrschbar zu halten. Die entwickelte Technik beinhaltet eine Methode zur sukzessiven Erweiterung und ist prototypisch in Matlab und PostgreSQL umgesetzt.

Der zentrale Bestandteil der Modellierung ist die Abbildung von Verkehrsszenarien auf einem formalen Szenarienraum. Aufbauend auf dem Stand der Wissenschaft zur Modellierung von Szenarien und der Open World Assumption wird eine hierarchische Szenarienbeschreibungssprache (HSDL) entwickelt, die die Modellierung beliebiger Szenarien mit beliebigem Abstraktionsgrad ermöglicht. Die Grundlage dafür ist ein menschlich verständliches, hierarchisches und erweiterbares Alphabet aus Elementen, Verhaltensweisen, Parametern und Ereignissen. Damit die Szenarien automatisiert zu relevanten Verhaltensweisen und Risikomodellen zugeordnet werden können, wird parallel zur Szenarienbeschreibung eine Ähnlichkeitssuche entwickelt. Diese verknüpft auf Basis der formalen Beschreibung die Szenarien bzw. Bedingungen der Verhaltens- und Risikomodelle im Szenarienraum aufgrund ihrer Ähnlichkeit.

Ein Kernaspekt der entwickelten Risikobewertung ist die direkte Integration der Funktionsspezifikation und damit die direkte Bewertbarkeit von Funktionsänderungen. Gerade komplexe und neuartige Funktionen, wie das automatisierte Fahren, werden immer häufiger agil entwickelt, weil nicht von Anfang an alles spezifizierbar ist. Um bei dieser Art der Entwicklung eine effiziente Bewertung von potenziell sicherheitsrelevanten Auswirkungen zu ermöglichen, sind die spezifizierten Funktionsgrenzen sowie das Systemverhalten explizit modelliert. Die

umgesetzte Modellierung besteht aus Verhaltensmodellen, die sich jeweils nach ihren definierten Szenarienbedingungen zu den relevanten Szenarien zuordnen lassen. Durch ein abstraktes Priorisierungskonzept ist auch die Modellierung von optionalen Verhaltensweisen möglich. Die Szenarien werden auf Basis der zugeordneten Verhaltensmodellen um das Systemverhalten erweitert. Das Konzept der Verhaltensmodellierung ist anhand der Beispielfunktion Autobahnchauffeur dargestellt.

Ein ähnliches Konzept wird für die relevanten Risiken genutzt. Diese sind ebenfalls durch entsprechende Modelle und Szenarienbedingungen modelliert und automatisiert verknüpft. Die Berechnung des Risikos wird in einzelne Wahrscheinlichkeitsterme für Szenarien, Szenarienparameter, Funktionsgrenzen, Verhalten bzw. Fehlverhalten, Kollision und Schaden gegliedert. Das Vorgehen zur Ermittlung der notwendigen Szenarien- und Szenarienparameter-Wahrscheinlichkeiten wird aufgrund deren entscheidendem Einfluss und schwieriger Abschätzbarkeit anhand ausgewählter Beispiele gezeigt.

Anschließend werden die einzelnen Modellbestandteile auf Basis der Ähnlichkeitssuche miteinander verknüpft und durch zusätzliche Schnittstellendefinitionen zwischen Verhaltens- und Risikomodellen automatisch zu einem Gesamtmodell integriert. Dabei sind zusätzliche Abdeckungsfaktoren notwendig, die die Überlappungen von Szenarien und Modellen aufgrund der sukzessiven Detaillierung in der Gesamtberechnung kompensieren. Der erfolgreiche Konzeptbeweis wird anhand eines Beispiels dargestellt, bevor die Erfüllung der Anforderungen an die Technik argumentiert wird. Abschließend erfolgt die Diskussion der wichtigsten Einschränkungen der Technik. Wie bei jeder Modellierung müssen dabei gewisse Vereinfachungen und aufgrund der formalisierten Beschreibung Zusatzaufwand in Kauf genommen werden.

8.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Entwicklung und prototypische Umsetzung der Technik zur Risikobewertung fokussiert. Demnach ist der nächste konsequente Schritt, das begonnene Beispiel in einem Entwicklungsprojekt zu vervollständigen. Die dafür notwendigen Funktionalitäten sind grundsätzlich umgesetzt, lediglich die Robustheit und Anwendbarkeit der Toolimplementierung sollte dafür verbessert werden. Durch die umfassende Anwendung werden sich auch zahlreiche Fragestellungen zur sinnvollsten Szenarienmodellierung ergeben, die bereits durch die erweiterbare Beschreibungssprache abgedeckt sind. Folglich ist daraus kein wissenschaftlicher Mehrwert zu erwarten. Ein interessanter Aspekt ist dabei jedoch die Robustheit der Ähnlichkeitssuche mit Mehrdeutigkeiten in der Modellierung. Darüber hinaus sind sämtliche Modellierungen von weiteren Risiken oder die Ermittlung von entsprechenden Szenarienstatistiken eigene wissenschaftliche Fragestellungen, die je nach Relevanz genauer untersucht werden sollten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Risikobewertung im Straßenverkehr der nächsten Jahre, der im Rahmen dieser Arbeit ausgeklammert wurde, ist der Faktor Mensch. Die wissenschaftliche Modellierung von Fahrern ist ein umfassendes Forschungsfeld, deren Ergebnisse in die Risikomodelle dieser Technik integriert werden können. Dabei sind sowohl die Modellierung der Fahrer des umgebenden Verkehrs als auch die Berücksichtigung von möglichen Eingriffen des automatisiert gefahrenen Fahrers für das Risiko potenziell relevant. Gerade bei der Interaktion zwischen automatisierten Fahrfunktionen und den dann gefahrenen

Fahrern gibt es aktuell noch viele Fragestellungen. Aufgrund der fehlenden umfassenden Felderfahrung sind vor allem Langzeit- und Gewöhnungsaspekte noch weitgehend unerforscht.

Die vorgestellte Technik beschreibt die Risikobewertung in Abhängigkeit einer variablen Funktionsspezifikation. Ähnlich einer quantitativen Fehlerbaumanalyse können so die größten Risikotreiber identifiziert und durch Funktionsanpassungen entsprechend reduziert werden. Dabei kann gerade die Wahl von risikominimierenden Parametern durch entsprechende Optimierungsansätze automatisiert unterstützt werden. Bei komplexen Problemstellungen benötigen die Einzelauswertungen jedoch häufig zu viele Rechenressourcen, um effizient optimieren zu können, weshalb häufig Metamodelle eingesetzt werden. Durch den mehrstufigen Modellaufbau ist eine explizite Abbildung dieser unterschiedlich komplexen Modelle in der Bewertungsmethodik möglich. Die Auswahl und Implementierung geeigneter Optimierungsansätze ist dementsprechend eine sinnvolle Erweiterung.

Ein Nebenprodukt der Technikanwendung ist eine genaue Analyse von relevanten Risiken und deren Wirkweisen. Dieses Wissen kann dann direkt für die Implementierung risikoarmer Verhaltensweisen von automatisierten Fahrzeuge angewendet werden [156].

Außerdem ist noch die Integration der Risikobewertung in die Entwicklungsprozesse nötig. Gerade für die Entwicklung komplexer Systeme ist eine Integration in die Entwicklung mit SysML prädestiniert. Die in der Technik vorgesehene schrittweise Detaillierung der Verhaltensmodelle entspricht der Ableitung von Funktionalitäten aus Use-Cases. Die entsprechenden Verhaltensmodelle auf System- und Komponentenebene können direkt mit den jeweiligen statischen und dynamischen Architekturen verbunden werden. Die Ausarbeitung der Integration der entwickelten Technik in SysML und einer entsprechenden Umsetzung ist demnach ein weiterer Forschungsaspekt.

Neben der Integration in den klassischen Entwicklungsprozess ist auch die Interaktion mit der Simulation und Resimulation von realistischen Szenarien und Messfahrten ein zu untersuchender Aspekt. Die vorgestellte Technik versucht die Lücke zwischen sehr abstrakten Bewertungen und detaillierten Simulationen durch eine verständliche und über mehrere Abstraktionsgrade nachvollziehbare Modellierung zu schließen. Dabei ist einerseits die Entwicklung eines Mappings der Szenariensprache auf Simulationsszenarien ein notwendiger Bestandteil, um diese in die Risikobewertung integrieren zu können. Andererseits ist auch die automatisierte Klassifikation von Szenarien in aufgezeichneten Messdaten und der darauf basierenden Identifikation von unbekanntem, relevanten Szenarienausprägungen ein offener Aspekt.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Schematischer Aufbau der Arbeit	4
Abb. 2.1:	Schematische Darstellung der Gefährdungstheorie nach Ericson [16, S. 36]....	6
Abb. 2.2:	Abstraktionsebenen zur Überführung des Verkehrsgeschehens in einen Zustandsraum, einen Aussagenraum und einen Risikozustandsraum [53, S. 313].....	13
Abb. 2.3:	exemplarische Risikostruktur mit den gefährlichen Fehlerzuständen A und L sowie deren Vermeidungszustände durch Fehler- (<i>f</i>) und Vermeidungsaktionen (<i>m</i>) [53, S. 323]	13
Abb. 3.1:	Anwendung der Vorgehensweise zur methodischen Modellbildung nach Schnieder [7, S. 205] auf die vorliegende Problemstellung mit den jeweiligen Kapitelnummern der Arbeit	17
Abb. 3.2:	Schematische Darstellung der Separation in Szenarien, Funktionsspezifikation und Risiko-modell mit Beispielen für die einzelnen Bestandteile	20
Abb. 3.3:	Schematische Darstellung der Verknüpfung der einzelnen Modellbestandteile auf Basis des Szenarienraums <i>ScSp</i> entlang der Bewertungsmethodik	21
Abb. 3.4:	(a) Spezialisierung beschreibt frei wählbare Detaillierung der Szenarienbedingungen der Modelle im Szenarienraum (b) Konkretisierung beschreibt stufenweise Detaillierung der Modellierungsart.....	22
Abb. 3.5:	Ablaufdiagramm der unterschiedlichen möglichen Vorgehensweisen zum Erstellen, Erweitern und Präzisieren der Modellierungen der Risikobewertung	25
Abb. 4.1:	Grundsätzliches Konzept der Szenarien-beschreibung von Bach nach [81, S. 1150].....	30
Abb. 4.2:	Filmanalogie zur Abbildung von Abläufen nach [81, S. 1152].....	30
Abb. 4.3:	Schematische Darstellung der Beschreibung eines Beispielszenarios mittels Elementen, Verhaltensweisen, Parameter und Ereignisse (links) und schematische Abbildung des Szenarios aus der Vogelperspektive (rechts)	34
Abb. 4.4:	Oberste Abstraktionsebene der definierten Beschreibungssprache.....	35
Abb. 4.5:	Schematische Darstellung der schrittweisen Eingrenzung des Suchraums bei der Suche von ähnlichen Szenarien.	39
Abb. 4.6:	Veranschaulichung des Vergleichs unterschiedlicher Parametereinschränkungen	41
Abb. 4.7:	Schematische Darstellung der zeitlichen Rangfolge der Ereignisse zweier Szenarien, der möglichen Verknüpfung aufgrund von Ereignisähnlichkeiten sowie einer verbleibenden, möglichen Zuordnung auf Basis der gesuchten Rangfolge	43
Abb. 4.8:	Beispiel einer schematischen Szenariendarstellung aus [90, S. 1342]	45
Abb. 4.9:	a) Visualisierung des exemplarischen Szenarios (Tabelle 4.3) durch die aufgezeichneten, aufeinanderfolgenden Kamerabilder; b) Darstellung der	

	modellierten Zeitverläufe sowie abstrahierten Parameter zur detaillierten Beschreibung der Fahrstreifenwechsel im Szenario	47
Abb. 4.10:	Darstellung aller Ähnlichkeitswerte (links, schwarz=0, weiß=1) und aller Spezialisierungs-werte (rechts, normiert auf den Bereich schwarz=0 bis weiß=4) zwischen allen modellierten Szenarien	48
Abb. 5.1:	Darstellung der Konkretisierungs- und Modellierungsebenen für Verhaltensmodelle.....	58
Abb. 5.2:	Vorgehen zur Auswahl und Kombination relevanter Verhaltensweisen zu einem szenarienbezogenen Gesamtverhalten	59
Abb. 5.3:	Darstellung der hierarchischen Struktur der Verhaltensmodelle des Anwendungsbeispiels (inkl. der IDs der umgesetzten Modelle)	61
Abb. 5.4:	Modellierte Verzögerungsanforderungen des konstanten und des szenarienabhängigen Einscherrerreaktionsmodells für zwei unterschiedliche Einscherszenarien in 40 m und 70 m Entfernung mit -15 m/s^2 und -25 m/s^2 Relativgeschwindigkeit.....	63
Abb. 5.5:	Veranschaulichung einer einfachen probabilistischen Latenzspezifikation	64
Abb. 6.1:	Kausalfaktorenmodell für Gefährdungen und Risiken nach Ericson [16, S. 38]	70
Abb. 6.2:	Grafische Veranschaulichung der möglichen Modellierungskategorien für Risiken	77
Abb. 6.3:	Schematische Darstellung der Risikoberechnung für ein Szenario mit relevanten Zwischengrößen wie der Parameterverteilung $f(psc)$, der Verhaltenswahrscheinlichkeit $P(Be1)$ und den Kollisionsparameterverteilungen $f(pC)$	79
Abb. 6.4:	Generischer Ansatz zur Klassifikation von Szenarien in Messdaten zur Abschätzung von Auftretenswahrscheinlichkeiten der Szenarien nach [150] ..	81
Abb. 6.5:	(a) Schematische Darstellung einer Einschersituation; (b) kumulative, relative Häufigkeit von Auftretensraten des Szenarios über alle ausgewerteten Messfahrten.....	82
Abb. 6.6:	(a) Angepasste Wahrscheinlichkeitsverteilungen an die mittleren Beschleunigungsdaten und (b) Quantile-Quantile-Plot der t-Lage-Skalenverteilung mit den Ergebnissen der Anpassungstests	86
Abb. 6.7:	Separate Modellierung des Extremwertbereichs mittels generalisierter Paretoverteilung	87
Abb. 6.8:	(a) Scatterdarstellung mit Randverteilungen des Datensatzes der Parameter d_x und v_{rel} (b) Von t-Copula Modellierung gezogene Parameterverteilung.	87
Abb. 6.9:	Darstellung des Einflusses von Verhaltensvarianten auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Szenarienparametern	89
Abb. 6.10:	Beispielresultate der Kollisionsmodellierung von Einscherrern für eine Parameterkombination $dx, vrel$ ohne und mit der zusätzlichen Verhaltensweise „Reduktion der Relativgeschwindigkeit“ mit den relevanten Verhaltensparametern $T_{sys}, amin, aCA$	92
Abb. 6.11:	Exemplarische Verletzungsrisikofunktion für Auffahrunfälle nach [34, S. 51], aus Abbildung extrahiert ($\beta_0, lv = -1.4, \beta_1, lv = 0.078; \beta_0, mv = -4.3, \beta_1, mv = 0.07; \beta_0, sv = -7.7, \beta_1, sv = 0.072$).....	93
Abb. 6.12:	Eingangsgößen für die Risikoberechnung bei verzögernden Vorderfahrzeugen: (a) Spezifikation von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten des	

	HAV in Zustandsbereichen der Folgefahrt und (b) deskriptive Statistik der relevanten Szenarienparameter.....	94
Abb. 6.13:	Darstellung der schrittweisen Modellkonkretisierung für das Beispiel des Einschererrisikos	95
Abb. 6.14:	(a) Plausibilisierung der Modellkonkretisierungen durch Abtastung des Wertebereichs mit angeglichenen Parametern und (b) Plausibilisierung der Ergebnisse der MC Simulation	96
Abb. 6.15:	Schematische Darstellung der Modellierung der Risiken durch Abkommen vom Fahrstreifen	96
Abb. 7.1:	Darstellung der exemplarischen Modellbestandteile, der manuell erstellten Verknüpfungen zwischen Modellen und Bedingungen (schwarz) sowie die automatisiert generierten Verknüpfungen durch die Ähnlichkeitssuche (blau, Beschriftung Ähnlichkeitssuche)	100
Abb. 7.2:	Exemplarische Darstellung einer Risikoreduktion durch Hinzufügen einer Verhaltensweise	101
Abb. A.7.1:	Mögliche Definition der maximalen lateralen Abweichungen im Zustandsraum durch maximale laterale Ablage und eine maximale Querschleunigung von 5 m/s^2	xxxvii
Abb. A.9.1:	Konvergenzverlauf der Kollisionswahrscheinlichkeit der Einschererrisikoberechnung	xliv
Abb. A.10.1:	Veranschaulichung Szenarienabdeckungsfaktor	xlv

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Morphologischer Kasten zur möglichen Einteilung von Bewertungsmethoden mit hervorgehobenen, behandelten Auswahlen	6
Tabelle 2.2:	Qualitative Kategorien für Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensschwere [21]	7
Tabelle 4.1:	Aus Literatur abgeleitetes Fahrmanöverset mit Zuordnung der relevanten Quellen.....	35
Tabelle 4.2:	Abstrahierte formale Beschreibung des Beispiels aus Abb. 4.3.....	45
Tabelle 4.3:	Abstrahierte formale Beschreibung einiger wesentlicher Aspekte des Messdatenszenarios inkl. der Eventabfolge	46
Tabelle 5.1:	Exemplarische Darstellung der Beispielsystemgrenze <i>nur Autobahn</i>	56
Tabelle 5.2:	Definition und Veranschaulichung der unterschiedlichen Konkretisierungslevel der Verhaltensmodelle.....	57
Tabelle 6.1:	Verwendete Stoßzahlen für Kollisionen nach [145, S. 379]	75
Tabelle 6.2:	Korrelationskoeffizienten für relevante Parameter des Einschererszenarios allgemein (sowie für die kritischen SHRP2 Szenarien)	85
Tabelle A.1.1:	Vergleich der gestellten Anforderungen mit ähnlichen Arbeiten	xxii
Tabelle A.3.1:	Export der formalen Repräsentation von Beispielszenarien aus der Literatur ([90, S. 1342], [91]).....	xxvi
Tabelle A.4.1:	Formale Beschreibung der Funktionsgrenzen der Beispielfunktion.....	xxx
Tabelle A.6.1:	exemplarische Auflistung der wichtigsten, abstrakten Verhaltensweisen sowie deren Verhaltensbedingungen im Szenarienraum, Werte in Klammern sind die lokale IDs von Elementen auf die referenziert werden kann	xxxiii
Tabelle A.8.1:	Übersicht über die exemplarisch umgesetzten Risikomodelle	xl
Tabelle A.8.2:	Annahmen des Risikomodells <i>Auffahrunfall auf dynamisches Objekt im FS</i> . xl	
Tabelle A.8.3:	Annahmen des Risikomodells <i>Auffahrunfall auf Einscherer auf CL0</i>	xli
Tabelle A.8.4:	Annahmen des Risikomodells <i>Auffahrunfall auf Einscherer auf CL2</i>	xli
Tabelle A.8.5:	Annahmen des Risikomodells <i>Kollision mit Randbebauung auf CL2</i>	xlii

Literaturverzeichnis

- [1] Appel Hermann, Krabbel Gerald, Vetter Dirk, *Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion*, 2nd Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2002.
- [2] T. M. Gasser, *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, 2012.
- [3] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*, J3016, 2016.
- [4] A. Seeck, "Euro NCAP - Auf dem Weg zur Automatisierung?," in *VDI-Berichte*, Bd. 2288, *Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren: 32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung : Wolfsburg, 08. und 09. November 2016*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016.
- [5] NHTSA, "Federal Automated Vehicles Policy: Accelerating the Next Revolution In Roadway Safety," Washington, D.C, Sep. 2016. [Online] Verfügbar: <https://www.transportation.gov/AV>. Gefunden am: Aug. 16 2017.
- [6] R. Adler und P. Feth, "Safety Assurance for Highly and Fully Automated Driving," in *Proceedings 26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, 2017, S. 659–670.
- [7] E. Schnieder und L. Schnieder, *Verkehrssicherheit*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [8] D. Wittmann, C. Wang, und M. Lienkamp, "Method for Comprehensive and Adaptive Risk Analysis for the Development of Automated Driving," in *20th International Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2017.
- [9] C. Gold, D. Dambock, L. Lorenz, und K. Bengler, "'Take over!' How long does it take to get the driver back into the loop?," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 57, Rn. 1, S. 1938–1942, 2013.
- [10] N. Ovcharova, *Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss.--Karlsruhe, 2013. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2014.
- [11] C. H. Fleming und N. G. Leveson, "Early Concept Development and Safety Analysis of Future Transportation Systems," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, S. 1–12, 2016.
- [12] *26262-1 Road vehicles - Functional safety - Part 1: Vocabulary*, ISO 26262-1:2011, 2011.
- [13] *26262-3 Road vehicles - Functional safety - Part3: Concept phase*, ISO 26262-3:2011, 2011.
- [14] S.-L. Bepperling, "Validierung eines semi-quantitativen Ansatzes zur Risikobeurteilung in der Eisenbahntechnik," Dissertation, Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2008.
- [15] K. Gschwendtner, *Sachschadenanalyse zur Potenzialermittlung von Fahrerassistenzsystemen - von der Unfalltypen-Erweiterung zum Kundenwert*. München: Dr. Hut, 2015.

- [16] C. A. Ericson, *Hazard analysis techniques for system safety*, 2nd Aufl. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [17] S. Kaplan und B. J. Garrick, "On The Quantitative Definition of Risk," *Risk Analysis*, Bd. 1, Rn. 1, S. 11–27, 1981.
- [18] M. V. Stringfellow, N. G. Leveson, und B. D. Owens, "Safety-Driven Design for Software-Intensive Aerospace and Automotive Systems," *Proc. IEEE*, Bd. 98, Rn. 4, S. 515–525, 2010.
- [19] N. Leveson, "A new accident model for engineering safer systems," *Safety Science*, Bd. 42, Rn. 4, S. 237–270, 2004.
- [20] N. G. Leveson, "A New Accident Model for Engineering Safer Systems," Working Paper, ESD Working Papers; ESD-WP-2003-01.19-ESD Internal Symposium, 2002.
- [21] *Standard Practice System Safety*, MIL-STD-882E, 2012.
- [22] G. Bechmann, "Risiko ein neues Forschungsfeld?," in *Risiko und Gesellschaft*, G. Bechmann, Hrsg, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1993, S. VII–XXIX.
- [23] R. Bell und D. Reinert, "Risk and system integrity concepts for safety-related control systems," in *COMPASS '93: Eighth Annual Conference on Computer*, 1993, S. 15–34.
- [24] G. A. Peters und B. J. Peters, *Automotive vehicle safety*. London, New York: Taylor & Francis, 2002.
- [25] Slovak, "Methodische Modellierung und Analyse von Sicherungssystemen des Eisenbahnverkehrs," Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2006.
- [26] J. Schäuffele und T. Zurawka, *Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen*, 5th Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [27] *ISO/IEC/IEEE 24765-2010(E), Systems and software engineering — Vocabulary*, 24765:2010(E), 2010.
- [28] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt, und M. Maurer, "Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren," in *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS 2015*, Darmstadt: Uni-DAS e.V, 2015, S. 105–117.
- [29] A. Ismail und J. Won, "Research trends in automotive functional safety," in *Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), 2013 International Conference on*, 2013, S. 1–4.
- [30] *26262-3 Road vehicles - Functional safety - Part3: Concept phase*, ISO 26262-3:2018(E), 2018.
- [31] M. Hillenbrand, "Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik/Elektronik Architekturen von Fahrzeugen," Dissertation, Institut für Technik der Informationsverarbeitung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Hannover, Karlsruhe, 2012.
- [32] F. Reinbold, "Integration einer Gefährdungs- und Risikoanalyse in den Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen nach ISO 26262," in *AAET 2014 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel: Beiträge zum gleichnamigen 15. Braunschweiger Symposium vom 12. und 13. Februar 2014*, DLR e. V, Braunschweig, Braunschweig: ITS Niedersachsen, 2014, S. 135–150.
- [33] S. Busch, *Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.

-
- [34] L. Hannawald, *Multivariate Bewertung zukünftiger Fahrzeugsicherheit: Entwicklung eines Modells zur Bewertung zukünftiger Fahrzeugsicherheit unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Sicherheitssystemen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008.
- [35] H. Winner, W. Wachenfeld, und P. Junietz, "Neue Anforderungen an Testverfahren und Integrationstools für automatisiertes Fahren," in *VDI-Berichte*, Bd. 2288, *Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren: 32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung : Wolfsburg, 08. und 09. November 2016*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016.
- [36] T. Helmer, L. Wang, K. Kompass, und R. Kates, "Safety Performance Assessment of Assisted and Automated Driving by Virtual Experiments: Stochastic Microscopic Traffic Simulation as Knowledge Synthesis," in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2015): [Las Palmas], Gran Canaria, Spain, 15 - 18 September 2015*, Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 2019–2023.
- [37] G. Bagschik, A. Reschka, T. Stolte, und M. Maurer, "Identification of potential hazardous events for an Unmanned Protective Vehicle," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium: IV 2016*, 2016, S. 691–697.
- [38] A. Mallya, V. Pantelic, M. Adedjouma, M. Lawford, und A. Wassynig, "Using STPA in an ISO 26262 Compliant Process," in *Lecture Notes in Computer Science, Computer Safety, Reliability, and Security*, A. Skavhaug, J. Guiochet, und F. Bitsch, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 117–129.
- [39] G. Bagschik, T. Stolte, und M. Maurer, "Safety Analysis Based on Systems Theory Applied to an Unmanned Protective Vehicle," *Procedia Engineering*, Bd. 179, S. 61–71, 2017.
- [40] A. Abdulkhaleq, S. Wagner, D. Lammering, H. Boehmert, und P. Blueher, "Using STPA in Compliance with ISO 26262 for Developing a Safe Architecture for Fully Automated Vehicles," *ArXiv e-prints*, <https://arxiv.org/abs/1703.03657>, 2017.
- [41] S. Kemmann und M. Trapp, "SAHARA -A Systematic Approach for Hazard Analysis and Risk Assessment," in *SAE 2011 World Congress & Exhibition: SAE International*, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2011.
- [42] T. Ständer, "Eine modellbasierte Methode zur Objektivierung der Risikoanalyse nach ISO 26262," Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, TU Braunschweig, Braunschweig, 2010.
- [43] C. Roesener, F. Fahrenkrog, A. Uhlig, und L. Eckstein, "A scenario-based assessment approach for automated driving by using time series classification of human-driving behaviour," in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC): Windsor Oceanico Hotel, Rio de Janeiro, Brazil, November 1-4, 2016*, Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 1360–1365.
- [44] R. Mader *et al*, "A Computer-Aided Approach to Preliminary Hazard Analysis for Automotive Embedded Systems," in *18th IEEE International Conference and Workshops on Engineering of Computer Based Systems (ECBS)*, 2011, S. 169–178.
- [45] Y. Papadopoulos, "Model-based semiautomatic safety analysis of programmable systems in automotive applications," in *International Conference on Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)*, 2001, S. 53–57.
- [46] Y. Papadopoulos und C. Grante, "Techniques and tools for automated safety analysis & decision support for redundancy allocation automotive systems," in *27th Annual International Computer Software and Applications Conference*, 2003, S. 105–110.
- [47] A. C. Madrigal, *Inside Waymo's Secret World for Training Self-Driving Cars*. [Online] Verfügbar: <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2017/08/inside-waymos-secret-testing-and-simulation-facilities/537648/>. Gefunden am: Mai. 20 2018.

- [48] C. Sippl, F. Bock, D. Wittmann, H. Altinger, und R. German, "From Simulation Data to Test Cases for Fully Automated Driving and ADAS," in *LNCS sublibrary. SL 2, Programming and software engineering*, Bd. 9976, *Testing software and systems: 28th IFIP WG 6.1 International Conference, ICTSS 2016, Graz, Austria, October 17-19, 2016, Proceedings*, F. Wotawa, M. Nica, und N. Kushik, Hrsg, Cham, Switzerland: Springer, 2016, S. 191–206.
- [49] C. Rodemerck, S. Habenicht, A. Weitzel, H. Winner, und T. Schmitt, "Development of a general criticality criterion for the risk estimation of driving situations and its application to a maneuver-based lane change assistance system," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2012, S. 264–269.
- [50] J. Eggert, "Predictive Risk Estimation for Intelligent ADAS Functions," in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2014)*, 2014, S. 711–718.
- [51] T. Schamm und J. M. Zollner, "A model-based approach to probabilistic situation assessment for driver assistance systems," in *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2011)*, 2011, S. 1404–1409.
- [52] T. Schamm, "Modellbasierter Ansatz zur probabilistischen Interpretation von Fahrsituationen," Dissertation, Institut für Anthropomatik und Robotik, KIT, Karlsruhe, 2014.
- [53] M. Gleirscher und S. Kugele, "From Hazard Analysis to Hazard Mitigation Planning: The Automated Driving Case," in *Lecture Notes in Computer Science, NASA Formal Methods*, C. Barrett, M. Davies, und T. Kahsai, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 310–326.
- [54] M. Gleirscher und S. Kugele, "Defining Risk States in Autonomous Road Vehicles," in *2017 IEEE 18th International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE)*, 2017, S. 112–115.
- [55] R. Adler, P. Feth, und D. Schneider, "Safety Engineering for Autonomous Vehicles," in *2016 46th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W)*, 2016, S. 200–205.
- [56] *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen*, DIN EN ISO 13849-1:2015, 2016.
- [57] B. Matthias, S. Kock, H. Jerregard, M. Kallman, und I. Lundberg, "Safety of collaborative industrial robots: Certification possibilities for a collaborative assembly robot concept," in *2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, 2011, S. 1–6.
- [58] J. Guiochet, D. Martin-Guillerez, und D. Powell, "Experience with Model-Based User-Centered Risk Assessment for Service Robots," in *2010 IEEE 12th International Symposium on High-Assurance Systems Engineering (HASE)*, 2010, S. 104–113.
- [59] S. Dogramadzi *et al*, "Environmental Hazard Analysis - a Variant of Preliminary Hazard Analysis for Autonomous Mobile Robots," *J Intell Robot Syst*, 2014.
- [60] D. Wittmann, C. Wang, und F. Diermeyer, "Methodische Definition von sicherem Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge," in *VDI-Berichte*, Bd. 2288, *Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren: 32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung : Wolfsburg, 08. und 09. November 2016*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016, S. 357–371.
- [61] M. Hulsen, J. M. Zollner, und C. Weiss, "Traffic intersection situation description ontology for advanced driver assistance," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2011, S. 993–999.
- [62] D. Wittmann, C. Wang, und M. Lienkamp, "Definition and identification of system boundaries of highly automated driving," in *7. Tagung Fahrerassistenz*, 2015.

- [63] T. Schaller, "Stauassistentz - Längs- und Querführung im Bereich niedriger Geschwindigkeit," Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2009.
- [64] K. Bengler, A. Pütz, C. Purucker, M. Götze, und B. Färber, "Das UR:BAN Assistenzszenario als Konstrukt für die Entwicklung und Bewertung integrierter Fahrerassistenzsysteme," in Bd. 69, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 2015, S. 99–104.
- [65] S. Geyer *et al*, "Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance," *IET Intelligent Transport Systems*, 2013.
- [66] S. Geyer, "Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung," Dissertation, Maschinenwesen, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013.
- [67] G. Bagschik, T. Menzel, A. Reschka, und M. Maurer, "Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen," in *12. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2017.
- [68] F. Schuldt, T. Menzel, und M. Maurer, "Eine Methode für die Zuordnung von Testfällen für automatisierte Fahrfunktionen auf X-in-the-Loop Verfahren im modularen virtuellen Testbaukasten," in *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS 2015*, Darmstadt: Uni-DAS e.V, 2015, S. 171–182.
- [69] C. Domsch und H. Negele, "Einsatz von Referenzfahrsituationen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen," in *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2008.
- [70] H.-H. Nagel, "A vision of 'vision and language' comprises action: An example from road traffic," (English), *Artificial Intelligence Review*, Bd. 8, Rn. 2-3, S. 189–214, <http://dx.doi.org/10.1007/BF00849074>, 1994.
- [71] W. Tölle, *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*. Düsseldorf: VDI-Verl, 1996.
- [72] M. Dambier, *Adaptive Information Flow Control: Recognition and Prediction of Factors Contributing to Driver's Stress*. Tönning: Der Andere Verlag, 2010.
- [73] A. Okuno, K. Fujita, und A. Kutami, "Visual Navigation of an Autonomous On-Road Vehicle: Autonomous Cruising on Highways," in *Springer Series in Perception Engineering, Vision-based Vehicle Guidance*, R. C. Jain und I. Masaki, Hrsg, New York, NY: Springer New York, 1992, S. 222–237.
- [74] W. Fastenmeier, J. Hinderer, U. Lehning, und H. Gstalter, "Analyse von Spurwechselforgängen im Verkehr," *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Bd. 55, S. 15–23, 2001.
- [75] H.-H. Nagel und M. Arens, "Innervation des Automobils und Formale Logik," in *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung: [basiert auf ausgewählten Vorträgen eines Workshops in Walting (Altmühltal)]*, M. Maurer und C. Stiller, Hrsg, Berlin: Springer, 2005, S. 89–116.
- [76] S. Hakuli, M. Schreiber, und H. Winner, "Entwicklung eines Methodenkatalogs für manöverbasiertes Fahren nach dem Conduct-by-Wire-Prinzip - Ein Fahrerassistenzkonzept auf Bahnführungsebene," in *1. Automobiltechnisches Kolloquium*, München, 2009.
- [77] A. Hermann und J. Desel, "Driving situation analysis in automotive environment," in *International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, 2008, S. 216–221.

- [78] S. Vacek, T. Gindele, J. M. Zollner, und R. Dillmann, "Using case-based reasoning for autonomous vehicle guidance," in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, S. 4271–4276.
- [79] S. Vacek, T. Gindele, J. M. Zollner, und R. Dillmann, "Situation classification for cognitive automobiles using case-based reasoning," in *Intelligent Vehicles Symposium*, 2007, S. 704–709.
- [80] S. Vacek, "Videogestützte Umfelderkennung zur Interpretation von Verkehrssituationen für kognitive Automobile," Dissertation, Fakultät für Informatik, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe, 2008.
- [81] J. Bach, S. Otten, und E. Sax, "Model-based scenario specification method to support development and test of automated driving functions," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium: IV 2016*, 2016, S. 1149–1155.
- [82] A. Weitzel, *Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung*. Bremen: Fachverlag NW, 2014.
- [83] R. Bergmann, *Experience management: Foundations, development methodology, and Internet-based applications*. Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- [84] A. N. Papadopoulos und Y. Manolopoulos, "Structure-based similarity search with graph histograms," in *Proceedings. Tenth International Workshop on Database and Expert Systems Applications. DEXA 99*, 1999, S. 174–178.
- [85] P. Shvaiko und J. Euzenat, "A Survey of Schema-Based Matching Approaches," in *Lecture Notes in Computer Science, Journal on Data Semantics IV*, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, M. Sudan, D. Terzopoulos, D. Tygar, M. Y. Vardi, G. Weikum, und S. Spaccapietra, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, S. 146–171.
- [86] W. Brauer, K.R. Dittrich, und A. Geppert, Hrsg, *Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [87] G. Reichart, *Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen*. Düsseldorf: VDI-Verl, 2001.
- [88] J. E. Hopcroft, R. Motwani, und J. D. Ullman, *Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Berechenbarkeit: Introduction to automata theory, languages, and computation*, 3rd Aufl. München, Boston, Harlow: Pearson Studium, 2011.
- [89] H.-H. Nagel, W. Enkelmann, und G. Struck, "FhG-Co-driver: From map-guided automatic driving by machine vision to a cooperative driver support," *Mathematical and Computer Modelling*, Bd. 22, Rn. 4-7, S. 185–212, 1995.
- [90] M. Platho, H.-M. Gross, und J. Eggert, "Traffic situation assessment by recognizing interrelated road users," in *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2012)*, 2012, S. 1339–1344.
- [91] T. Stolte, G. Bagschik, A. Reschka, und M. Maurer, "Hazard analysis and risk assessment for an automated unmanned protective vehicle," in *28th IEEE Intelligent Vehicles Symposium: June 11-14, 2017, Redondo Beach, California, USA*, Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 1848–1855.
- [92] F. Köster, T. Form, K. Lemmer, und J. Plättner, "Wie gut müssen automatisierte Fahrzeuge fahren - PEGASUS," in *AAET 2016: Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Braunschweig, 2016, S. 292–300.
- [93] RESPONSE 3, "Code of Practice: for the Design and Evaluation of ADAS," V5.0, 2009. [Online] Verfügbar: https://www.acea.be/uploads/publications/20090831_Code_of_Practice_ADAS.pdf.

-
- [94] E. Donges, "Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen," *Automobil-Industrie*, Bd. 2/82, Rn. 2, S. 183–190, 1982.
- [95] W. Fastenmeier und H. Gestalter, "Entwicklung und Anwendung einer neuen Methodik zur Fahraufgabenanalyse," *VDI-Berichte*, Rn. 1768, S. 197–213, 2003.
- [96] K.-H. Siedersberger, "Komponenten zur automatisierten Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen," Dissertation, Institut für Systemdynamik und Flugmechanik, Universität der Bundeswehr, München, 2003.
- [97] S. Friedenthal, A. Moore, und R. Steiner, *A practical guide to SysML: The systems modeling language*, 2014.
- [98] F. Mhenni, Nga Nguyen, H. Kadima, und J. Choley, "Safety analysis integration in a SysML-based complex system design process," in *2013 7th Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, 2013, S. 70–75.
- [99] S. Schreiber *et al*, "UML-based safety analysis of distributed automation systems," in *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (EFTA 2007)*, 2007, S. 1069–1075.
- [100] G. Biggs, T. Sakamoto, K. Fujiwara, und K. Anada, "Experiences with model-centred design methods and tools in safe robotics," in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013)*, 2013, S. 3915–3922.
- [101] S. Gulan, S. Johr, R. Kretschmer, S. Rieger, und M. Ditze, "Graphical modelling meets formal methods," in *2013 IEEE 11th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2013, S. 716–721.
- [102] D. Reichardt, "Kontinuierliche Verhaltenssteuerung eines autonomen Fahrzeugs in dynamischer Umgebung," Dissertation, Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 1996.
- [103] J. Schröder, *Adaptive Verhaltensentscheidung und Bahnplanung für kognitive Automobile*. Karlsruhe: Univ.-Verl, 2009.
- [104] A. Reschka, G. Bagschik, S. Ulbrich, M. Nolte, und M. Maurer, "Ability and skill graphs for system modeling, online monitoring, and decision support for vehicle guidance systems," in *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2015, S. 933–939.
- [105] M. Nolte *et al*, "Towards a Skill- and Ability-Based Development Process for Self-Aware Automated Road Vehicles," in *20th International Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2017, S. 739–744.
- [106] B. Vanholme, D. Gruyer, S. Glaser, und S. Mammar, "A legal safety concept for highly automated driving on highways," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2011, S. 563–570.
- [107] B. Vanholme, "Highly Automated Driving on Highways based on Legal Safety," Dissertation, University of Evry-Val-d'Essonne, 2012.
- [108] B. Vanholme, D. Gruyer, B. Lusetti, S. Glaser, und S. Mammar, "Highly Automated Driving on Highways Based on Legal Safety," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, Bd. 14, Rn. 1, S. 333–347, 2013.
- [109] A. Rizaldi und M. Althoff, "Formalising Traffic Rules for Accountability of Autonomous Vehicles," in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems: IEEE*, 2015, S. 1658–1665.
- [110] S. Shalev-Shwartz, S. Shammah, und A. Shashua, "On a Formal Model of Safe and Scalable Self-driving Cars: Mobileeye," *CoRR*, Bd. abs/1708.06374, 2017.
- [111] L. Zhao, R. Ichise, S. Mita, und Y. Sasaki, "An Ontology-Based Intelligent Speed Adaptation System for Autonomous Cars," in *Lecture Notes in Computer Science, Semantic Technology*, T. Supnithi, T. Yamaguchi, J. Z. Pan, V. Wuwongse, und M. Buranarach, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 397–413.

- [112] NHTSA, “Automated driving systems 2.0: A vision for safety,” Washington, D.C, Sep. 2017. [Online] Verfügbar: <https://www.nhtsa.gov/document/automated-driving-systems-20-voluntary-guidance>. Gefunden am: Okt. 30 2017.
- [113] D. Raba, “Erstellung von Verhaltensmodellen automatisierter Fahrzeuge zur Risikobewertung,” Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [114] F. G. O. Lotz, “Eine Referenzarchitektur für die assistierte und automatisierte Fahrzeugführung mit Fahrereinbindung,” Technische Universität Darmstadt, 2017.
- [115] R. Adler und S. Kemmann, “Towards safe autonomic driving: Enhancing traditional hazard and risk analysis,” in *Commercial Vehicle Technology 2014: Proceedings of the 3rd Commercial Vehicle Technology Symposium (CVT 2014)*, K. Berns, C. Schindler, K. Dreßler, B. Jörg, R. Kalmar, und G. Zolynski, Hrsg. 1st Aufl, Aachen: Shaker, 2014, S. 3–12.
- [116] S. Ebel, U. Wilhelm, A. Grimm, und U. Sailer, “Wie sicher ist sicher genug?: Anforderungen an die funktionale Unzulänglichkeit von Fahrerassistenzsystemen in Anlehnung an das gesellschaftlich akzeptierte Risiko,” in *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS2009*, 2009, S. 48–57.
- [117] B. Sheehan, F. Murphy, C. Ryan, M. Mullins, und H. Y. Liu, “Semi-autonomous vehicle motor insurance: A Bayesian Network risk transfer approach,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 82, S. 124–137, 2017.
- [118] R. Kruse *et al*, *Computational Intelligence*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [119] N. E. Fenton, *Risk assessment and decision analysis with Bayesian networks*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
- [120] C. Beierle und G. Kern-Isberner, *Methoden wissensbasierter Systeme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [121] F. Frey, “Implementierung von Risikomodellen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen zur Bewertung hochautomatisierter Fahrzeuge,” Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [122] A. Meyna und B. Pauli, *Zuverlässigkeitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren*, 1st Aufl. München: Hanser, Carl, 2010.
- [123] G. Shafer, *A mathematical theory of evidence*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1976.
- [124] 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,” Virginia Tech Transportation Institute, Apr. 2016. [Online] Verfügbar: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/70850?show=full>. Gefunden am: Sep. 08 2016.
- [125] G. Burzio *et al*, “A subjective field test on lane departure warning function in the framework of the euroFOT project,” in *2009 2nd Conference on Human System Interactions (HSI)*, 2009, S. 608–610.
- [126] *Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen: RSA*, 1995.
- [127] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, “Richtlinien für die Anlage von Autobahnen,” 2008.
- [128] I. Dagli, G. Breuel, H. Schittenhelm, und A. Schanz, “Cutting-in vehicle recognition for ACC systems towards feasible situation analysis methodologies,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2004, S. 925–930.
- [129] J. Schneider, A. Wilde, und K. Naab, “Probabilistic approach for modeling and identifying driving situations,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2008*:

- Eindhoven, Netherlands, 4 - 6 June 2008, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2008, S. 343–348.
- [130] M. Tsogas, A. Polychronopoulos, N. Floudas, und A. Amditis, "Situation refinement for vehicle maneuver identification and driver's intention prediction," in *10th International Conference on Information Fusion, 2007*, S. 1–8.
- [131] M. Benmimoun, F. Fahrenkrog, und A. Benmimoun, "Automatisierte Situationserkennung zur Bewertung des Potentials von Fahrerassistenzsystemen im Rahmen des Feldversuchs "euroFOT", in *Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit: 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung : Tagung Wolfsburg, 6. und 7. Oktober 2010*, Düsseldorf: VDI Verlag, 2010, S. 231–245.
- [132] M. Benmimoun, F. Fahrenkrog, A. Zlocki, und L. Eckstein, "Detection and Classification of Critical Incidents by Means of Vehicle Data," *ATZ Worldw*, Bd. 114, Rn. 10, S. 60–66, 2012.
- [133] R. K. Satzoda und M. M. Trivedi, "Drive Analysis Using Vehicle Dynamics and Vision-Based Lane Semantics," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, Bd. 16, Rn. 1, S. 9–18, 2015.
- [134] M. Reichel, M. Botsch, R. Rauschecker, K.-H. Siedersberger, und M. Maurer, "Situation aspect modelling and classification using the Scenario Based Random Forest algorithm for convoy merging situations," in *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2010, S. 360–366.
- [135] P. Glauner, A. Blumenstock, und M. Haueis, "Exposition zur Raffung der Felderprobung für Fahrerassistenzsysteme," in *FAS 2014: 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, Darmstadt: Uni-DAS e.V, 2014.
- [136] D. Althoff, J. J. Kuffner, D. Wollherr, und M. Buss, "Safety assessment of robot trajectories for navigation in uncertain and dynamic environments," *Auton Robot*, Bd. 32, Rn. 3, S. 285–302, 2012.
- [137] T. Brunner, "Weiterentwicklung und Umsetzung einer Risikobewertung von Trajektorien für hochautomatisiertes Fahren," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015.
- [138] C. Segler, "Risikobewertung von Trajektorien beim hochautomatisierten Fahren," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015.
- [139] A. Lambert, D. Gruyer, und G. Saint Pierre, "A fast Monte Carlo algorithm for collision probability estimation," in *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision: IEEE*, 2008, S. 406–411.
- [140] M. Althoff, O. Stursberg, und M. Buss, "Model-Based Probabilistic Collision Detection in Autonomous Driving," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, Bd. 10, Rn. 2, S. 299–310, 2009.
- [141] T. Kim und H.-Y. Jeong, "A Novel Algorithm for Crash Detection Under General Road Scenes Using Crash Probabilities and an Interactive Multiple Model Particle Filter," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, Bd. 15, Rn. 6, S. 2480–2490, 2014.
- [142] S. Alam *et al*, "Systemic identification of airspace collision risk tipping points using an evolutionary multi-objective scenario-based methodology," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 35, S. 57–84, 2013.
- [143] M. Edwards, A. Nathanson, und M. Wisch, "Benefit estimate and assessment methodologies for pre-crash braking part of forward-looking integrated pedestrian safety systems: ASPECSS D1.3," Jan. 2014. Gefunden am: Sep. 15 2015.

- [144] H. Johannsen, *Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion: Grundlagen der Unfallaufklärung ; mit 21 Tabellen*, 3rd Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Vieweg, 2013.
- [145] W. Kalthoff, "Die Stoßzahl - ein entscheidender Parameter bei der Rekonstruktion eines Auffahrunfalles," (de), *VRR*, Rn. 10, S. 375–379, 2009.
- [146] R. Grundler, B. Sinzig, T. Eichholzer, und A. Brunner, "Eingrenzung der Stoßzahl k für die Rekonstruktion von Heckkollisionen," *VKU*, Bd. 2008, Rn. 10, S. 289–298, 2008.
- [147] V. W. Antonetti, "Estimating the Coefficient of Restitution of Vehicle-to-Vehicle Bumper Impacts," (en), *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, 1998.
- [148] W. Kalthoff und M. Becke, "Die Stoßzahl bei Auffahrkollisionen: Ein wesentlicher Parameter zur Bestimmung der HWS-Belastung," (de), *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Rn. 10, S. 275–282, 2000.
- [149] J. Hedderich und L. Sachs, *Angewandte Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [150] L. Reinhart, "Erstellung und Umsetzung eines Konzepts zur Bestimmung der Häufigkeiten von Szenarien beim hochautomatisierten Fahren," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [151] C. Witcher *et al*, *SHRP2 Dataset: Predictive Safety - Analysis, whether statistical data can be used for driving safety purposes*. Verfügbar: doi:10.15787/VT1/O5TEIX.
- [152] C. Cottin und S. Döhler, *Risikoanalyse: Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen*, 1st Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [153] T. Becker, R. Herrmann, V. Sandor, D. Schäfer, und U. Wellisch, *Stochastische Risikomodellierung und statistische Methoden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [154] V. Bayer, Hrsg, *Multivariate Modellierung operationeller Risiken in Kreditinstituten*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012.
- [155] A. J. McNeil, R. Frey, und P. Embrechts, *Quantitative risk management: Concepts, techniques and tools*. Princeton, Oxford: Princeton University Press, 2015.
- [156] J. Feiler, "Entwicklung einer Risikoschätzung und Aktionsplanung für hochautomatisiertes Fahren," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [157] T. Müller-Gronbach, E. Novak, und K. Ritter, *Monte Carlo-Algorithmen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [158] O. Beucher, *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit MATLAB: Anwendungsorientierte Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [159] Bundesanstalt für Straßenwesen, "Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen in Deutschland," Bergisch Gladbach, Nov. 2016. [Online] Verfügbar: http://www.bast.de/DE/Statistik/Unfaelle/volkswirtschaftliche_kosten.html. Gefunden am: Dez. 29 2017.
- [160] A. Zlocki, C. Rösener, und H. Weber, "L3Pilot - Piloting Automated Driving on European Roads," in *Proceedings 26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, 2017, S. 647–657.
- [161] 26262-8 Road vehicles - Functional safety - Part8:, 26262-8:2011, 2011.
- [162] *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO*, 2013.
- [163] M. Ardel, C. Coester, und N. Kaempchen, "Highly Automated Driving on Freeways in Real Traffic Using a Probabilistic Framework," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, Bd. 13, Rn. 4, S. 1576–1585, 2012.

- [164] D. Weber, "Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz," Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, KIT, Karlsruhe, 2012.
- [165] A. Motella und M. Perneti, "Vehicle Occupant Impact Severity in Relation to Real World Impact Conditions," *Proceedings of the 2nd International Congress on New Technologies and Modeling Tools for Road*, Florenz, 2004.
- [166] C. Roque und J. L. Cardoso, "Observations on the relationship between European standards for safety barrier impact severity and the degree of injury sustained," *IATSS Research*, Bd. 37, Rn. 1, S. 21–29, 2013.
- [167] R. Sturt und C. Fell, "The relationship of injury risk to accident severity in impacts with roadside barriers," *International Journal of Crashworthiness*, Bd. 14, Rn. 2, S. 165–172, 2009.
- [168] D. Eager und C. Chapman, *Playground Surface Standards - A discussion paper*, 2004.
- [169] P. Prasad und H. J. Mertz, "The Position of the United States Delegation to the ISO Working Group 6 on the Use of HIC in the Automotive Environment," in : SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1985.
- [170] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, "Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme: RPS," 2009.
- [171] *Rückhaltesysteme an Straßen - Teil 2: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen und Fahrzeugbrüstungen*, 1317-2, 2011.

Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden. Nicht verwendete Arbeiten sind durch [*] gekennzeichnet.

Konferenzen und Veröffentlichungen; peer-reviewed

- [8] D. Wittmann, C. Wang, und M. Lienkamp, "Method for Comprehensive and Adaptive Risk Analysis for the Development of Automated Driving," in *20th International Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC)*, 2017
- [48] C. Sippl, F. Bock, D. Wittmann, H. Altinger, und R. German, "From Simulation Data to Test Cases for Fully Automated Driving and ADAS," in *LNCS sublibrary. SL 2, Programming and software engineering*, Bd. 9976, *Testing software and systems: 28th IFIP WG 6.1 International Conference, ICTSS 2016, Graz, Austria, October 17-19, 2016, Proceedings*, F. Wotawa, M. Nica, und N. Kushik, Hrsg, Cham, Switzerland: Springer, 2016, S. 191–206.
- [60] D. Wittmann, C. Wang, und F. Diermeyer, "Methodische Definition von sicherem Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge," in *VDI-Berichte*, Bd. 2288, *Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren: 32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung : Wolfsburg, 08. und 09. November 2016*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2016, S. 357–371.
- [*] D. Wittmann, F. Chucholowski, M. Lienkamp, „Improving lidar data evaluation for object detection and tracking using a priori knowledge and Sensorfusion“ in *Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics; (ICINCO)*, 2014

Konferenzen und Veröffentlichungen; nicht peer-reviewed

- [62] D. Wittmann, C. Wang, und M. Lienkamp, "Definition and identification of system boundaries of highly automated driving," in *7. Tagung Fahrerassistenz*, München, 2015.
- [*] D. Wittmann, „Sicherheitskonzept für hochautomatisiertes Fahren“ in *Automatisierte Fahrzeugführung – Techniken und Methoden für Fahrerassistenzsysteme und Automatisiertes Fahren: Forum Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA*, 28.10.2015

Betreute Studienarbeiten

- [113] D. Raba, "Erstellung von Verhaltensmodellen automatisierter Fahrzeuge zur Risikobewertung," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [121] F. Frey, "Implementierung von Risikomodellen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen zur Bewertung hochautomatisierter Fahrzeuge," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.

- [137] T. Brunner, "Weiterentwicklung und Umsetzung einer Risikobewertung von Trajektorien für hochautomatisiertes Fahren," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015.
- [138] C. Segler, "Risikobewertung von Trajektorien beim hochautomatisierten Fahren," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015.
- [150] L. Reinhart, "Erstellung und Umsetzung eines Konzepts zur Bestimmung der Häufigkeiten von Szenarien beim hochautomatisierten Fahren," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [156] J. Feiler, "Entwicklung einer Risikoschätzung und Aktionsplanung für hochautomatisiertes Fahren," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [*] S. Schambeck, „Ermittlung von Sicherheitsanforderungen beim hochautomatisierten Fahren“ Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015
- [*] M. Weidinger, „Erkennung von Systemgrenzen beim hochautomatisierten Fahren auf der Autobahn“, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015
- [*] W. Degel, „Entwicklung von Sicherheitskriterien zur Plausibilisierung von Trajektorien beim automatisierten Fahren“, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015
- [*] M. Grüner, „Entwicklung und Bewertung von Notmanövern beim hochautomatisierten Fahren“, Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015
- [*] C. Radinger, „Simulation von hochautomatisierten Fahrzeugen im Fahrsimulator“, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015
- [*] C. Ganter, „Beschreibung und Analyse von Risikofaktoren und deren Einflussfaktoren im Verkehr beim hochautomatisierten Fahren“, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2016
- [*] P. Thimet, „Modelling of risks in highly automated driving by means of Ontology“, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2016

Anhang

Inhaltsverzeichnis

A.1	Plausibilisierung der Anforderungen.....	xxii
A.2	Mathematische Formulierungen im Szenarienraum	xxiii
A.3	Beispielmodellierungen von Szenarien	xxvi
A.4	Modellierung der Funktionsgrenzen	xxx
A.5	Formulierungen der Verhaltensauswahl.....	xxxii
A.6	Szenarienbedingungen der Verhaltensweisen.....	xxxiii
A.7	Exemplarische Verhaltensmodelle	xxxv
A.8	Annahmen Risikomodelle	xl
A.9	Abbruchkriterium Monte Carlo Simulation.....	xliv
A.10	Abdeckungsfaktoren	xliv

A.1 Plausibilisierung der Anforderungen

Da die gestellten Anforderungen einen entscheidenden Einfluss auf den Umfang der Methodik und die abschließenden Bewertungen haben, werden diese mit vergleichbaren Arbeiten in der Literatur verglichen. Bepperling [14] behandelt in ihrer Arbeit die Validierung einer Risikobeurteilung in der Eisenbahntechnik basierend auf zehn Anforderungen. Ovcharova [10] erweitert eine Methodik zur Bewertung von kurzfristig intervenierenden Fahrerassistenzsystemen um eine detailliertere Betrachtung des Fahrers. Die in Abschnitt 1.2 definierten Anforderungen werden jeweils mit den korrespondierenden Anforderungen verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle A.1.1 dargestellt.

Tabelle A.1.1: Vergleich der gestellten Anforderungen mit ähnlichen Arbeiten

Hier gestellte Anforderung o- der Einschränkung	Vergleich mit Anforderungen von Bepperling [14, S. 61]	Vergleich mit Anforderungen von Ovcharova [10, S. 61]
A1: Abstraktionsvermögen	~A05: qualitative Analysen	-
A2: Konkretisierbarkeit	-	-
A3: variable Funktionsdefinition	~ A04: unabhängige Systemfunk- tionen	~3) Echtes System: reales FAS
A4: Fehlerbewertung und Systemleistungsfähigkeit	-	-
A5: Normkonformität	-	-
A6: Szenarienvielfalt	-	~1) Gesamtes reales Unfall- geschehen
A7: Nachvollziehbarkeit	A08: Begründung der Methode, Annahmen	~7) objektive Nutzenbewer- tung
A8: Plausibilität	~A06 alle relevanten Risikoparameter ~A07 Genauigkeit innerhalb einer 10er Potenz	3) Echtes System 5) Echtes Fahrverhalten 6) Qualität der Ergebnisse
A9: Wissensbasis	-	-
Fahrer wird hier explizit nicht berücksichtigt	A03: Mensch-Technik Modell	2) Gesamte Fahrerpopulation 4) Echtes Fahrerverhalten
Keine Definition eines akzeptablen Restrisikos angestrebt	A01: gesamt Risiko gering genug, A02: implizites Risiko	-
Die Einheit ergibt sich mathematisch aus Risikoformel	A09 Ergebnisse und Sicherheits- ziel haben gleiches Format	-
Ergibt sich mathematisch aus Risikoformel	A10 Fähigkeit, verschiedene Parameter auszugleichen	-

A.2 Mathematische Formulierungen im Szenarienraum

Zur Beschreibung von Szenarien wird in dieser Arbeit eine formale Sprache entwickelt. Eine formale Sprache, wie die hier entwickelte hierarchische Szenarienbeschreibungssprache (HSDL), ist definiert als eine Menge von Zeichenreihen aus allen möglichen Zeichenreihen Σ^* über einem Alphabet Σ [88, S. 56].

$$HSDL \subseteq \Sigma^* \quad (\text{A.2.1})$$

Übertragen auf die HSDL ist diese auf einem Alphabet Σ aus Elementen, Verhaltensweisen, Parametern und Ereignissen definiert (Abschnitt 4.3.2). Die Sprache *HSDL* definiert, wie gültige „Wörter“ aus diesem Alphabet gebildet werden, was im Folgenden als Grammatik der Sprache bezeichnet wird. Jede so erstellte Zeichenreihe beschreibt schließlich ein Szenario. Semantisch beschreiben Wörter dieser Sprache eine Teilmenge aller real auftretenden Verkehrsszenarien durch Einschränkung gewisser Freiheitsgrade. Der Raum aller auftretenden Verkehrsszenarien wird mit *ScSp* bezeichnet.

Der Szenarienraum *ScSp* umfasst alle real auftretenden Verkehrsszenarien und ist dementsprechend beliebig komplex. Jedes in der HSDL beschriebene Szenario stellt somit ein „Wort“ der Sprache dar. Aufgrund der Open World Assumption sind Szenarien nie eindeutige Elemente und sind deshalb als Teilmengen des Szenarienraums definiert.

$$sc \in HSDL \rightarrow sc \subseteq \text{ScSp} \quad (\text{A.2.2})$$

Theoretisch beschreibt die leere Zeichenreihe der HSDL ein Szenario ohne irgendwelche Einschränkungen und damit den gesamten *ScSp*. Je konkreter ein Szenario beschrieben ist, desto mehr Aspekte sind definiert und dementsprechend kleiner ist der beschriebene Bereich.

Szenarien bestehen aus Elementen aller verfügbaren Elemente *El* der Sprache, aus Verhaltensweisen, die jeweils an die Elemente geknüpft werden, aus Parametern der Elemente oder Verhaltensweisen und aus Ereignissen der Elemente oder Verhaltensweisen.

$$\begin{aligned} sc_i = & \left\{ \{el_k \in El \mid k \in \{1, \dots, K\}\}, \{beh_{l,k} \in Beh \mid l \in \{1, \dots, L\}\}, \{pa_{m,\bar{l}} \right. \\ & = x \mid pa_{m,\bar{l}} \in Pa_{k,\bar{l}}, m \in \{1, \dots, M\}\}, \left. \{ev_{n,\bar{l}} = t \mid ev_{n,\bar{l}} \right. \\ & \left. \left. \in Ev_{k,\bar{l}}, n \in \{1, \dots, N\}\} \right\} \quad (\text{A.2.3}) \end{aligned}$$

Neben der Auswahl der Parameter und Ereignisse ist auch die Definition der Werte sowie die Reihenfolge der Ereignisse Teil der Szenariendefinition.

Operationen auf Szenarien:

Ein Szenario wird als Teilmenge eines anderen Szenarios $sc_f \subseteq sc_s$ bezeichnet, wenn es die gleichen oder vererbte Elemente, Verhaltensweisen, Parameter und Ereignisse enthält.

$$\begin{aligned}
 sc_f \subseteq sc_s &\Leftrightarrow \forall k_s \exists k_f: el_{k_f} \leq el_{k_s} \\
 &\wedge \forall l_{s,k_s} \exists l_{f,k_f}: beh_{l_{f,k_f}} \leq beh_{l_{s,k_s}} \\
 &\wedge \forall m_{s,k/l_s} \exists m_{f,k/l_f}: pa_{m_{f,k/l_f}} \subseteq pa_{m_{s,k/l_s}} \\
 &\wedge \forall n_{s,k/l_s} \exists n_{f,k/l_f}: ev_{l_{f,k/l_f}} \leq ev_{l_{s,k/l_s}}
 \end{aligned} \tag{A.2.4}$$

Die Mächtigkeit/Kardinalität eines Szenarios $|sc_f|$ beschreibt die Größe des beschriebenen Szenarienraums. Da der Szenarienraum unendlich detailliert werden kann, ist eine absolute Beschreibung nicht möglich. Demnach wird die Mächtigkeit hier als relatives Maß zum Vergleich der eingeschränkten Freiheitsgrade zweier Szenarien definiert. Das Spezialisierungsmaß nimmt Werte über Eins an, wenn der beschriebene Szenarienraum sc_f kleiner als der des Suchszenarios ist $|sc_f| < |sc_s|$.

Elemente

Elemente sind im Alphabet der *HSDL* hierarchisch definiert. Kind-Elemente sind immer detaillierter als deren Elternelemente und beschreiben demnach einen kleineren Bereich im *ScSp*. Für die Ähnlichkeitssuche wird folgende abkürzende Schreibweise für identische oder nachfolgende Elemente verwendet:

$$el_{f,i} \leq el_{s,j} \Leftrightarrow el_{f,i} = el_{s,j} \vee el_{f,i} \in childs(el_{s,j}) \tag{A.2.5}$$

Verhaltensweisen

Verhaltensweisen sind im Alphabet analog zu den Elementen hierarchisch definiert. Die notwendigen Operationen sind demnach analog zu denen der Elemente.

Parameter

Jeder gewählte Parameter beschreibt neben der Auswahl aus den vorhandenen Parametern auch die Definition einer Teilmenge des Wertebereichs dieses Parameters. Bei numerischen Parametern und Aufzählungsparametern gelten die klassischen Regeln der Mengenlehre wie beispielsweise $pa_{f,i} \cap pa_{s,j}$ als Schnittmenge, $|pa_{f,i}|$ als Mächtigkeit und $pa_{f,i} \setminus pa_{s,j}$ als Mengendifferenz. Bei Referenzparametern sind prinzipiell keine mathematischen Operationen vorgesehen. Die Ähnlichkeit ergibt sich direkt aus der Ähnlichkeit der referenzierten Elemente.

Ereignisse

Der Vergleich des Szenarienablaufs auf Basis der definierten Ereignisse enthält mehrere Herausforderungen. Um die Auswirkung von Mehrdeutigkeiten in der Nutzung von Ereignissen zu reduzieren, ist für Ereignisse ein Ähnlichkeitskonzept implementiert. Dabei werden die Ereignisse eines Elements oder einer Verhaltensweise bereits im Alphabet jeweils mit einem Parameter σ belegt. Dieser ordnet alle Ereignisse eines Elements oder einer Verhaltensweise grob entlang eines relativen Zeitablaufs von 0 bis 1 ein. Je näher beieinander der erwartete Zeitpunkt zweier Ereignisse dabei ist, desto geringer soll auch die Differenz der σ Werte sein. Dadurch lässt sich die erwartete Ähnlichkeit von zwei Ereignissen generell beschreiben durch:

$$f_k(ev_{f,i}, ev_{s,j}) = 1 - |\sigma(ev_{f,i}) - \sigma(ev_{s,j})| \tag{A.2.6}$$

Die Flexibilität bei der Definition der Ereignisabfolge durch Rangfolge, relative Zeitabstände und absolute Zeitbereich wird in der Ähnlichkeitssuche im ersten Schritt durch die Umrechnung

in eine relative Rangfolge vereinheitlicht (siehe Abschnitt 4.4.4). Auf Basis dieser Rangfolge werden dann für alle möglichen Ereignis-Zuordnungen die jeweiligen Ähnlichkeiten der Ereignisse sowohl auf Basis von (A.7.4) als auch dem Vergleich der definierten Zeitbereiche berechnet.

A.3 Beispielmodellierungen von Szenarien

Zur Veranschaulichung der Szenarienmodellierung sind im Folgenden die formalen Beschreibungen von einigen der in Abschnitt 4.5.2 aufgeführten Beispielszenarien aus der Literatur dargestellt.

Tabelle A.3.1: Export der formalen Repräsentation von Beispielszenarien aus der Literatur ([90, S. 1342], [91])

Szenarienbezeichnung	Formale Modellierung mit Szenarien-Id, Elementen mit Parametern, Verhaltensweisen und Verhaltensparameter, Zugehörigkeit über Einrückung dargestellt, Referenzen und relative Werte in runden Klammern
Platho12	<pre> Sc243+EgoVehicle(1).IsEgo=1 +Follow_object_long.Target_object=(2) .on infrastructure=(5) .InitialRoute=[1,1] +Vehicle(2).IsLocatedOn=(5) .is located on route number(0)=[0,0] +Turn.direction={left} .on infrastructure=(5) .TargetRoute=[4,4] .InitialRoute=[1,1] +Vehicle(3).is located on route number(0)=[3,3] .IsLocatedOn=(5) +CrossIntersection.on infrastructure=(5) .TargetRoute=[1,1] .InitialRoute=[3,3] +Vehicle(4).Kind={passenger car} .is located on route number(0)=[4,4] .IsLocatedOn=(5) +Stop.Target_object=(8) .on infrastructure=(5) .InitialRoute=[4,4] +T-intersection(5).Domain={overland} .Domain={city} .priority rules={traffic light} .number of routes=[3,3] .number of entrance lane route1(0)=[1,1] .number of entrance lane route2(0)=[0,0] .number of entrance lane route3(0)=[1,1] .number of entrance lane route4(0)=[1,1] .number of exit lane route1(0)=[1,1] .number of exit lane route2(0)=[0,0] .number of exit lane route3(0)=[1,1] .number of exit lane route4(0)=[1,1] +traffic light(6).relevant for directions={all} .initial state={green} .located at=(5) .relevant for route(0)=[1,1] +traffic light(7).relevant for directions={all} .initial state={green} .located at=(5) .relevant for route(0)=[3,3] +traffic light(8).relevant for directions={all} .initial state={red} .located at=(5) .relevant for route(0)=[4,4] </pre>
aFAS1	<pre> Sc245+EgoVehicle(1).IsEgo=1 +Follow_object_long.Target_object=(2) .InitialVelocity=[0,25] +Vehicle(2) </pre>
aFAS2	<pre> Sc246+EgoVehicle(1).IsEgo=1 +Follow_corridor </pre>

aFAS2.1

```

Sc247+EgoVehicle(1).IsEgo=1
    .Lane(0)=[-1,-1]
    .IsLocatedOn=(2)
+Follow_corridor.ViolateCorridorBorderBy=[0,Inf]
+Vehicle(3).Lane(0)=[1,1]
    .IsLocatedOn=(2)
+Follow_corridor.on infrastructure=(2)
    .InitialLane=[1,1]
    .driving direction={opposite}
+Route(2).Domain={overland}
    .Domain={city}
    .Boundary to Oncoming={lanemarking}
    .Boundary to Oncoming={none}

```

aFAS2.2

```

Sc248+EgoVehicle(1).IsEgo=1
    .IsLocatedOn=(2)
+Follow_corridor.ViolateCorridorBorderBy=[0,Inf]
    .on infrastructure=(2)
+Vehicle(3).IsLocatedOn=(2)
+Follow_corridor.on infrastructure=(2)
+Route(2).Domain={highway}
    .Domain={similar to highway}
    .NumberOfLanes_EgoDirection(0)=[2,Inf]

```

aFAS3

```

Sc249+EgoVehicle(1).IsEgo=1
+Follow_object_long.Target_object=(2)
    .InitialVelocity=[0,25]
+Vehicle(3)
+Follow_object_long.Target_object=(1)
+Vehicle(2)

```

aFAS3.1 Detail-
lierung mit C-
Rationale

```

Sc250+EgoVehicle(1).IsEgo=1
+Follow_object_long.Target_object=(2)
+Stop.Acceleration_x=[-Inf,-8]
    .anti lock reaction={active}
+Vehicle(3)
+Follow_object_long.distance_to_object=[35,35]
    .Target_object=(1)
+Stop.Acceleration_x=[-6,-6]
+Vehicle(2)

```

aFAS1.1

```

Sc251+EgoVehicle(1).IsEgo=1
+Follow_object_long.Target_object=(2)
    .InitialVelocity=[0,25]
+Stop.Acceleration_x=[-4,-4]
+Vehicle(3)
+Follow_object_long.Target_object=(1)
+Stop.Acceleration_x=[-6,-6]
    .distance_to_object=[35,35]
    .Target_object=(1)
+Vehicle(2)

```

aFAS4

```

Sc252+EgoVehicle(1).IsEgo=1
+Follow_object_long.Target_object=(2)
    .InitialVelocity=[0,25]
+Vehicle(3)
+Vehicle(2)

```

A.3 Beispielmodellierungen von Szenarien

aFAS4.1

```
Sc253+Infrastructure(4).Domain={highway}
      .Domain={overland}
      .Domain={city}
      .Domain={similar to highway}
+EgoVehicle(1).IsEgo=1
  +Follow_object_long.Target_object=(2)
    .InitialVelocity=[0,25]
  +Stop.Acceleration_x=[-Inf,-5]
    .anti lock reaction={locking tires}
  +uncontrolled due to locking tires.leave own lane=1
+Vehicle(3)
+Vehicle(2)
```

aFAS5

```
Sc254+EgoVehicle(1).IsEgo=1
  +Follow_object_long.Target_object=(2)
+Vehicle(2)
```

aFAS5.1

```
Sc255+EgoVehicle(1).IsEgo=1
  +Follow_object_long.Acceleration_x=[2,Inf]
    .distance_to_object=[0,0]
    .Target_object=(2)
+Vehicle(2)
```

aFAS8

```
Sc256+MultipleLaneWithSeparationToOncomingTraffic(2).Boundary to
Oncoming={guardrail}
Oncoming={wall}
Oncoming={other}
OfLanes_EgoDirection=[2,Inf]
derExist=1
  +EgoVehicle(1).lane (qualitative={brake down lane})
    .IsEgo=1
      .Boundary to
      .Boundary to
      .Number-
      .HardShoul-
```

aFAS9

```
Sc258+EgoVehicle(1).Velocity_x(0)=[0,0]
      .IsEgo=1
  +Follow_object_long.Target_object=(2)
    .InitialVelocity=[0,0]
+Vehicle(2).Velocity_x(0)=[0,0]
```

aFAS10

```
Sc259+EgoVehicle(1).lane (qualitative={brake down lane})
      .IsEgo=1
  +Start
+Vehicle(3).Kind={truck}
  +Follow_object_long.Target_object=(2)
+Vehicle(2).Kind={truck}
      .lane (qualitative={right})
  +pass or overtake dynamic object.Target_object=(1)
+Route(4).Inclination(0)=[1,Inf]
```

```

aFAS10.1      Sc260+EgoVehicle(1).lane (qualitative={brake down lane}
               .IsEgo=1
               +Start
               +LaneChange_or_merge.CutInRearRelativeVelocity=[-Inf,-
22.2222]
               .ChangeToThe={left}
               .Velocity_y max=[0.4,0.4]
               +Vehicle(3).Kind={truck}
               +Follow_object_long.Target_object=(2)
               +pass or overtake dynamic object.Acceleration_y=[0,0]
               .Velocity_x_rela-
tive=[22.2222,Inf]
               .Distance_y=[-2.5,0]
               .Target_object=(1)
               +Vehicle(2).Kind={truck}
               .lane (qualitative={right})
               +pass or overtake dynamic object.Target_object=(1)
               +Route(4).Inclination(0)=[1,Inf]

```

```

aFAS10a      Sc261+EgoVehicle(1).lane (qualitative={brake down lane}
               .IsEgo=1
               +Start
               +Vehicle(2).Kind={passenger car}
               .lane (qualitative={right})
               +pass or overtake dynamic object.Target_object=(1)
               +Route(4).Inclination(0)=[1,Inf]

```

```

aFAS10a.1    Sc262+EgoVehicle(1).lane (qualitative={brake down lane}
               .IsEgo=1
               +Start
               +LaneChange_or_merge.CutInRearRelativeVelocity=[-Inf,-
22.2222]
               .ChangeToThe={left}
               .Velocity_y max=[0.4,0.4]
               +Vehicle(2).Kind={passenger car}
               .lane (qualitative={right})
               +pass or overtake dynamic object.Target_object=(1)
               +Route(4).Inclination(0)=[1,Inf]

```

A.4 Modellierung der Funktionsgrenzen

Zur Veranschaulichung der formalen Modellierung der Funktionsgrenzen sind die aus der Literatur bekannten Funktionsgrenzen des Autobahnchauffeurs (Kap. 5) als Export exemplarisch in Tabelle A.4.1 dargestellt.

Tabelle A.4.1: Formale Beschreibung der Funktionsgrenzen der Beispielfunktion

Textuelle Beschreibung Funktionsgrenze aus der Literatur	Formale Beschreibung der Funktionsgrenzen (FB) mit ihren jeweiligen Szenarienbedingungen (FBC) im Szenarienraum
Nur Autobahn oder autobahnähnliche Straßen ohne Autobahnraststätten, Autobahntankstellen, Baustellenbereiche auf Autobahnen, Autobahnanschlussstellen, Autobahnkreuze, Autobahndreiecke die Beschleunigungs- und Verzögerungstreifen, die Verteilerfahrbahn, die Verflechtungsstrecke, die Verbindungsrampen sowie die Überführungsbauwerke [2, S. 39]	<pre> FB1-FBC17+Infrastructure(1).Domain={city} -FBC18+Infrastructure(1).Domain={other} -FBC19+Infrastructure(1).Domain={overland} +FBC30+Infrastructure(1).Domain={highway} +FBC39+Infrastructure(1).Domain={similar to highway} FB10-FBC20+Intersection(1) -FBC21+Roundabout(1) -FBC23+Route(1).BoundaryToOncoming ={lanemarking, none, other} -FBC24+Route(1).Curvature=[0.0038, Inf] </pre>
Geschwindigkeitsbereich 0 – X km/h, [2, S. 39]	<pre> FB3-FBC5+Vehicle(1).IsEgo=1 .Velocity_x=[33.4, Inf] +FBC31+Vehicle(1).IsEgo=1 .Velocity_x=[0, 33.3] -FBC33+Vehicle(1).IsEgo=1 +DrivingManeuver(b1).InitialVelocity=[33.4, Inf] +FBC38+Vehicle(1).IsEgo=1 +DrivingManeuver(b1).InitialVelocity=[0, 33.3] </pre>
Baustellen	<pre> FB4-FBC8+Roadworks(1) </pre>
ESP-Eingriff, Öffnen des Gurtschlösses, reduzierte Fahrfähigkeit des Fahrers, relevanter technischer Defekt, Fahrstreifen wird nicht mehr erkannt: Diese Fälle werden vom System erkannt und führen zu einer Übernahmeaufforderung. Der Autobahn-Chauffeur kann jedoch für eine gewisse Zeit die Fahrzeugführung weiter durchführen, sodass diese Übernahmeaufforderung mit	<pre> FB6-FBC11+Vehicle(1).IsEgo=1 +OpenDoor(b1) -FBC25+Vehicle(1).IsEgo=1 +OpenDriverSeatbelt(b1) FB7- FBC12+Infrastructure(1).LanemarkingQuality=[0, 30] </pre>

ausreichender Zeitreserve
erfolgt. [2, S. 42]

„Glatteis, Aquaplaning,
Schneedecke oder Ölspur
voraus sind dem System
bekannt, alle relevanten
Hindernisse sind dem System
bekannt“ [2, S. 42]

```
FB8-
FBC13+EnvironmentalConditions(1).GlobalFriction
=[0,0.5]
```

„Wird in der Nähe des
Fahrzeuges vom System z.B.
ein Fußgänger erkannt, so
unterbleibt das automatisierte
Wiederanfahren und dem Fahrer
wird eine entsprechende
Übernahmeaufforderung
signalisiert.“ [92, S. 297]

```
FB9-FBC16+Vehicle(2).Velocity_x=[0,0]
                .IsEgo=1
    +otherTrafficParticipants(1).kind={pedes-
trian}
1:firstSightContact(1,b1)
2:leftPerceptionHorizon(1,b1)
```

Autobahn Verlassen, sowohl
eingeschlossen als auch
ausgeschlossen, um
Grenzscenarien automatisch
zuordnen zu können.

```
FB12-
FBC27+Infrastructure(2).Domain={highway,similar
to highway}
                .FollowedByInfrastruc-
tureElement=(1)
    +Infrastructure(1).Domain={city,over-
land,other}
    +Vehicle(3).IsEgo=1
                .IsLocatedOn=(2)
FB12+FBC40+Infrastructure(2).Domain={highway,si-
milar to highway}
                .FollowedByInfrastruc-
tureElement=(1)
    +Infrastructure(1).Domain={city,over-
land,other}
    +Vehicle(3).IsEgo=1
                .IsLocatedOn=(2)
```

A.5 Formulierungen der Verhaltensauswahl

Das in Abschnitt 5.4.2 beschriebene Vorgehen lässt sich formal folgendermaßen beschreiben. Die Menge aller für das Szenario potenziell relevanten Verhaltensweisen Sb_{sc_i} basiert auf den entsprechenden Verhaltens-Szenarienbedingungen Bc der Systemverhaltensweisen Sb :

$$Sb_{sc_i} = \{Sb | \exists bc_j \in Bc: bc_j \ni sc_i\} \quad (A.5.1)$$

Aufgrund der schrittweisen Konkretisierung und Spezialisierung der Verhaltensweisen sind neben den notwendigen, detailliertesten Verhaltensweisen potenziell auch abstraktere Versionen zugeordnet. Deshalb müssen alle Verhaltensweisen mit identisch zugeordneten Detaillierungen entfernt werden:

$$Sb_{sc_i,abs} = \{Sb_j | Sb_j \in Sb_{sc_i}, \nexists Sb_k \in Sb_{sc_i}: (Sb_j \in isconcr_{Sb_k} \vee Sb_j \in isspec_{Sb_k}) \wedge bc_k \subseteq bc_j\} \quad (A.5.2)$$

Nach der Auswahl dieser relevanten Verhaltensweisen werden mit Hilfe der Prioritäten $prio$ und Ausschlüsse $excl$ alle möglichen Verhaltenskonstellationen gebildet. Dabei wird für jede Verhaltensweise geprüft, ob diese durch eine andere Verhaltensweise ausgeschlossen wird:

$$\begin{cases} Sb_{sc_i,ex} = Sb_{sc_i,abs} \setminus Sb_j, \exists Sb_k: Sb_j \in excl_{Sb_k} \wedge prio_{Sb_k} \leq prio_{Sb_j} \\ Sb_{sc_i,ex} = \{Sb_{sc_i,abs} \setminus Sb_j; Sb_{sc_i,abs} \setminus Sb_k\}, \exists Sb_k: Sb_j \in excl_{Sb_k} \wedge prio_{Sb_k} > prio_{Sb_j} \\ Sb_{sc_i,ex} = Sb_{sc_i,abs}, \quad sonst \end{cases} \quad (A.5.3)$$

Erfolgt ein Ausschluss durch eine Verhaltensweise gleicher oder höherer Priorität (niedrigere Prioritätszahl $prio$) wird die Verhaltensweise ausgeschlossen. Ist die Priorität der ausschließenden Verhaltensweise geringer, handelt es sich um einen optionalen Ausschluss und es werden zwei unabhängige Sets von Verhaltensweisen gebildet. Erfolgt kein Ausschluss, bleibt die Verhaltensweise Bestandteil der relevanten Verhaltensweisen.

A.6 Szenarienbedingungen der Verhaltensweisen

Ein entscheidender Bestandteil der Verhaltensweisen sind die Verhaltensbedingungen, die definieren in welchen Situationen das Verhalten angewendet werden muss. In Tabelle A.6.1 sind die Bedingungen der Verhaltensmodelle aufgeführt. Da sich manche Aspekte auf mehrere Arten im Szenarienraum abbilden lassen und diese Mehrdeutigkeiten noch nicht in der Ähnlichkeitssuche berücksichtigt werden, sind diese als zusätzliche Szenarienbedingungen modelliert.

Tabelle A.6.1: exemplarische Auflistung der wichtigsten, abstrakten Verhaltensweisen sowie deren Verhaltensbedingungen im Szenarienraum, Werte in Klammern sind die lokale IDs von Elementen auf die referenziert werden kann

Verhaltensweise	Verhaltensbedingungen oder Änderung der Bedingung zur Elternverhaltensweise
>Geschwindigkeit einhalten	-BC57+Vehicle.IsEgo=1
• Maximale Funktionsgeschwindigkeit	-BC58=BC57
• Begrenzung Kurvengeschwindigkeit	-BC59+Route.Curvature=[0, Inf] -BC72+NodeWithoutCrossover.MinimalRadius=[0, Inf]
• Anhalteweg im Sichtbereich	-BC60=BC57
• Geschwindigkeitsbegrenzung einhalten	-BC61+Infrastructure.SpeedLimit=[0, Inf]
• Wunschgeschwindigkeit fahren	-BC68=BC57
>Fahrstreifen folgen	-BC13+Vehicle.IsEgo=1
• Fahrstreifen mittig folgen mit Toleranz	-BC38=BC13
>Fahrstreifenwechsel (FSW)	-BC15+Route(1).NumberOfLanes=[2, Inf] +Vehicle(2).IsEgo=1 .IsLocatedOn=(1) -BC19+Vehicle(1).IsEgo=1 +Vehicle(2) +LaneChange {FSW anscheinend möglich}
• FSW bei FS-Ende	-BC16+Vehicle(1).IsEgo=1 .IsLocatedOn=(2) +LaneReduction(2).NumberOfLanes=[2, Inf] -BC17+Route(1).NumberOfLanes=[2, Inf] +Vehicle(2).IsEgo=1 .IsLocatedOn=(2) +ConstructionSiteLaneReduction(3) .IsLocatedOn=(1)
• FSW taktisch	{in Unterverhalten spezifiziert}
◦ FSW überholen	-BC18+Route(1).NumberOfLanes=[2, Inf] +Vehicle(2).IsEgo=1 +Vehicle(3).PositionX(1)=[0, Inf] .Lane(1)=[0, 0]
◦ FSW Rechtsfahrgebot	-BC18+Route(1).NumberOfLanes=[2, Inf] +Vehicle(2).IsEgo=1 .LaneQualitative={left, middle} +NoDynamicObjectsInDefinedSpace(3) .Lane(1)=[-1, -1]
• FSW strategisch	-

A.6 Szenarienbedingungen der Verhaltensweisen

>Objekt folgen	-BC84+Vehicle (1) .IsEgo=1 +FollowObject.TargetObject=(2) +Vehicle (2) -BC85+Vehicle (1) .IsEgo=1 +Vehicle (2) .PositionX (1)=[0, Inf] {vor dem Ego} .Lane (1)=[0, 1] {links oder auf selbem FS}
	...
• Abstand zum Vorderfahrzeug halten	-BC89=BC85\ +Vehicle (2) .Lane (1)=[0, 0] {auf selbem FS}
• Rechtsüberholverbot	-BC67=BC84+ +Vehicle (2) .Lane (1)=[1, 1]
	...
• Einfädeln lassen	-BC97+Vehicle (1) .IsEgo=1 +Vehicle (2) .PositionX (1)=[0, Inf] .Lane (1)=[-1, -1] +LaneChange.SheerInFrontOf=(1) .E:SetIndicator
>Annähern an Objekt	-
• Annähern an langsames Fahrzeug	-BC7+Vehicle (1) .IsEgo=1 +Vehicle (2) .PositionX (1)=[0, Inf] .VelocityX (1)=[-Inf, 0] .Lane (1)=[0, 0] -BC8+Vehicle (1) .IsEgo=1 +Follow.TargetObject=(2) .RelativeVelocity=[-Inf, 0] +Vehicle (2)
• Annähern an stehendes Hindernis	-BC47+Vehicle (1) .IsEgo=1 .IsLocatedOn=(2) +LaneReduction (2) -BC48+Vehicle (1) .IsEgo=1 +Obstacles (2) .Lane (1)=[0, 0] .RemainingLaneWidth=[0, 2] -BC71+Vehicle (1) .IsEgo=1 .IsLocatedOn=(2) +RoadWorksLaneReduction (2)
• Reaktion auf Einscherer	-BC9+Vehicle (1) .IsEgo=1 +Vehicle (2) +LaneChange.CutInInFrontOf=(1) -BC10+Vehicle (1) .IsEgo=1 +Vehicle (2) .PositionX (1)=[0, Inf] +LaneChange.TargetLane (1)=[0.0]
>Objekt passieren	-
• Lateralen Mindestabstand einhalten	-
• Relativgeschwindigkeit begrenzen	-BC39+Vehicle (1) .IsEgo=1 +Vehicle (2) .Lane (1)=[-1, 1]
>Hindernis Ausweichen	-BC28+Obstacle (1) .Lane (2)=[0, 0] +Vehicle (2) .IsEgo=1
>Verhalten an Funktionsgrenze	-
• Anhalten an rechtem Rand	-

A.7 Exemplarische Verhaltensmodelle

Um die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik zu zeigen, wurde diese auf das Anwendungsbeispiel eines Autobahnchauffeur-Systems angewendet und die relevantesten Verhaltensanforderungen in Zusammenarbeit mit [113] in Verhaltensweisen modelliert.

A.7.1. Geschwindigkeiten einhalten

Die wohl trivialsten Verhaltensanforderungen beziehen sich auf die generelle Wahl der Geschwindigkeit, die hier durch fünf Einzelverhaltensweisen konkretisiert wird.

Maximale Funktionsgeschwindigkeit

Zur Auslegung der Funktion ist es notwendig, eine maximale Geschwindigkeit zu definieren, die nicht überschritten wird und damit als Auslegungsparameter modellierbar ist.

Geschwindigkeit an Kurven und Begrenzungen anpassen

Neben reinen Komfortanforderungen ist es auch aus Sicherheitssicht notwendig, die Geschwindigkeit in Kurven zu reduzieren. Auf Autobahnen treten zwar generell geringere Krümmungen κ auf, dennoch können Stadtautobahnen Radien von 280 m aufweisen [127, S. 27-28]. Zur Modellierung dieser Verhaltensanforderung bietet sich die Definition einer maximalen Querbeschleunigung $a_{y,curv,max}$, einer Erkennungsreichweite $d_{x,det,curv}$ sowie einer Erkennungslatenz $T_{lat,curv}$ an [107, S. 96]:

$$v_{x,curv,max} = \sqrt{\frac{a_{y,curv,max}}{\kappa}} \quad (A.7.1)$$

$$a_{x,curv,max} = -\frac{v_{x,curv,max}^2 - v_{ego}^2}{2(d_{x,det,curv} - v_{ego}T_{lat,curv})}$$

Dadurch kann die maximale Geschwindigkeit und die mindestens notwendige Verzögerung vor Kurven modelliert werden und damit in Risikomodellen integriert werden. Analog kann auch die Verhaltensweise **Geschwindigkeitsbegrenzung einhalten** modelliert werden, wobei $v_{x,limit,max}$ die gültige Geschwindigkeitsbegrenzung ist und die abgeleitete Verzögerung in der Höhe begrenzt wird, weil eine zu starke Verzögerung auf spät erkannte Geschwindigkeitsbegrenzungen eher nachteilig für die Sicherheit zu bewerten ist.

Geschwindigkeit an Anhalteweg anpassen

Laut Straßenverkehrsordnung „darf nur so schnell gefahren werden, dass innerhalb der übersehbaren Strecke gehalten werden kann“ [162, S. 2]. Demnach lässt sich direkt aus der geforderten Erkennungsreichweite $d_{det,obj}$ und verfügbaren Verzögerung auf die maximal zulässige Geschwindigkeit schließen

$$v_{x,break,max} = a_{x,min} \left(-T_{lat} + \sqrt{T_{lat}^2 + 2 \frac{d_{det,obj}}{a_{x,min}}} \right) \quad (A.7.2)$$

Dabei erscheint es sinnvoll, die Erkennungsreichweite als probabilistische Größe zu modellieren und demnach für unterschiedlichen Entfernungen oder weitere Effekte unterschiedliche Erkennungswahrscheinlichkeiten zu definieren. Darüber hinaus ist die

maximal mögliche Verzögerung vom Reibwert abhängig. Dementsprechend können Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Reibwerterkennung ebenfalls in das Verhaltensmodell integriert werden und folglich potenzielle Risiken von der erwarteten Ungenauigkeit berücksichtigt werden.

Wunschgeschwindigkeit fahren

Neben den bisher definierten Maximalgrenzen für die Geschwindigkeit definiert diese Anforderung auch die Wahl einer beliebigen Setzgeschwindigkeit. Aus Sicht der Risikobewertung kann diese Verhaltensweise durch eine Worst-Case Modellierung abgebildet werden, dass immer die aus den anderen Bedingungen folgende, maximal mögliche Geschwindigkeit gefahren wird.

A.7.2. Fahrstreifen folgen

Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten und großen Radien von Autobahnen wird dort häufig vereinfachend die longitudinale und laterale Bewegung getrennt betrachtet. Demnach beinhaltet die Verhaltensweise Fahrstreifen folgen hier lediglich die laterale Führung. Grundsätzlich sind unterschiedlichste Anforderungen an diese Verhaltensweise denkbar. Die wohl einfachste Modellierung besteht aus der Definition von zulässigen lateralen Toleranzen, um die das Ego-Fahrzeug maximal von der Fahrstreifenmitte abweichen darf. Durch diese Repräsentation können die Anforderungen auch direkt auf Subkomponenten wie Wahrnehmung, Planung und Ausführung verteilt werden. Allerdings müssen aufgrund des komplexen zeitlichen Zusammenwirkens der Komponenten noch weitere Anforderungen abgeleitet werden, um eine Einhaltung auf Fahrzeugebene umsetzen zu können. Das hängt allerdings von der Umsetzung der einzelnen Komponenten ab und wird dementsprechend nicht weiter vertieft.

Da neben der Ablage auch die Quergeschwindigkeit relativ zur Fahrstreifenmitte eine fundamentale Rolle für die Risikobewertung spielen kann, wird hier eine Modellierung im Zustandsraum gewählt. Durch die Parametrierung mit einer maximalen Ablage sowie einer maximalen Querbeschleunigung kann der zulässige Zustandsraum eingegrenzt werden, wie in Abb. A.7.1 für eine maximale korrigierende Querbeschleunigung von 5 m/s^2 dargestellt.

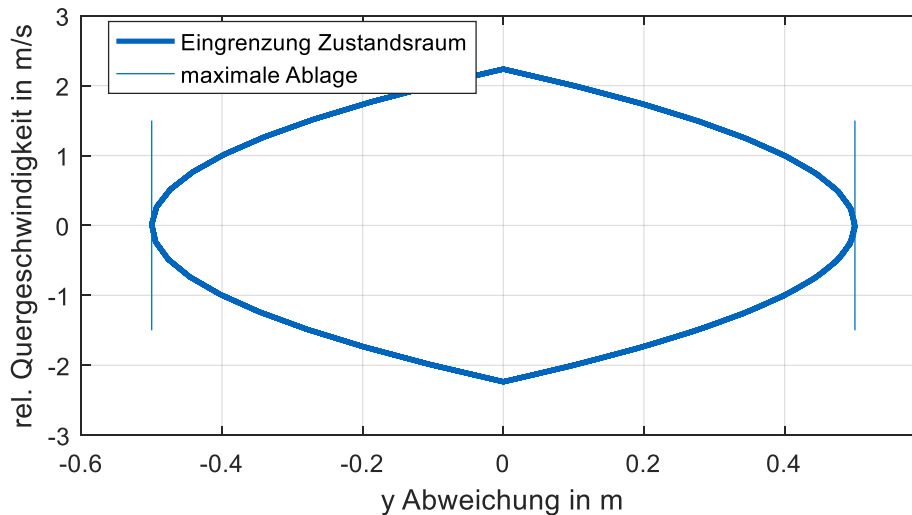


Abb. A.7.1: Mögliche Definition der maximalen lateralen Abweichungen im Zustandsraum durch maximale laterale Ablage und eine maximale Querbeschleunigung von 5 m/s^2

A.7.3. Fahrstreifen wechseln

Für die Risikobewertung gibt es mehrere relevante Aspekte von Fahrstreifenwechseln (FSW). Zunächst einmal stellt sich die Frage nach Risiken, die durch den eigenen FSW verursacht werden. Dafür sind in erster Linie die Gefährdungen der Verkehrsteilnehmer auf den benachbarten Fahrstreifen (FS) relevant. Es können unterschiedlichste Bedingungen für die Freigabe eines FSW definiert werden. Entscheidend ist, dass sich auf dem linken FS kein anderes Fahrzeug befindet, das durch den FSW gefährdet wird. Dies lässt sich beispielsweise wie von Ardelt [163, S. 1581] formuliert modellieren, wobei der Mindestabstand durch eine Zeitlücke ersetzt wird

$$d_x + v_{rel}(t_{react} + t_{br}) + \frac{1}{2} a_{br} t_{br}^2 < v_{ego}(t_{react} + t_{br}) + v_{ego} T_{min} \quad (\text{A.7.3})$$

Dementsprechend kann die FSW-Bedingung durch eine angenommene Reaktionszeit des überholenden Fahrers t_{react} , dessen Verzögerung a_{br} sowie den verbleibenden Mindestabstand aufgrund der akzeptablen, minimalen Zeitlücke T_{min} parametrisiert werden. Die Dauer der Bremsung t_{br} ergibt sich aus der aktuellen Dynamik der Situation mit dem Abstand d_x und Relativgeschwindigkeit v_{rel} . Neben der Entscheidungsbedingung sind darüber hinaus die Erkennungsmöglichkeiten wieder vereinfacht durch eine Reichweite sowie eine Erkennungslatenz modelliert.

Eine mögliche Erweiterung wäre aufgrund der beschränkten Sensorreichweite nach Hinten bei unbeschränkten Geschwindigkeiten auch explizit die Erkennung eines herannahenden Fahrzeugs auf dem linken Fahrstreifen zu fordern.

Die Dynamik des Fahrstreifenwechsel kann vergleichbar zum Ausweichen (Abschnitt A.7.7) durch eine maximale Querbeschleunigung parametrisiert werden.

A.7.4. Objekt folgen

Aus Sicht der Risikobewertung ist die Verhaltensweise Objekt folgen vor allem aufgrund einer möglichen Verzögerung des Vorderfahrzeugs relevant. Die notwendige Reaktion auf eine solche Situation ist aber in der Verhaltensweise *Annähern an Objekt* bereits berücksichtigt. Interessant ist dennoch das gewählte Abstandsverhalten des Ego-Fahrzeugs, weil sowohl Abstand als auch Relativgeschwindigkeit einen entscheidenden Einfluss auf das Risiko von Auffahrunfällen haben und demnach entsprechend der restlichen Spezifikation gewählt werden müssen. Demnach wird das Folgeverhalten hier durch die Definition von Wahrscheinlichkeiten bestimmter Zeitlücken- und Relativgeschwindigkeitsbereiche beschrieben (Abb. 6.12). Eine solche Anforderung ist für eine Risikobewertung gut nutzbar, für die Funktionsentwicklung und die Überprüfung der Anforderung müssen dann jeweils die kritischen Szenarien, die zum Eintauchen in limitierte Bereiche führen, identifiziert werden und deren Häufigkeit bestimmt werden.

A.7.5. Annähern an Objekt

Annäherung an dynamisches Objekt

Die Annäherung an ein langsames Objekt kann vereinfachend durch eine nötige Beschleunigung

$$a_{dtst} = a_{VF} + \frac{1}{2} \frac{v_{rel}^2}{v_{VF} T_{min} + d_{min} - dx} \quad (A.7.4)$$

zum Erreichen einer gewünschten Zeitlücke T_{min} mit einem Mindestabstand d_{min} in Abhängigkeit der Dynamikgrößen modelliert werden [60]. Die Einschränkungen des Systems werden vereinfacht durch eine Gesamtlatenzzeit sowie eine maximal mögliche Verzögerung abgebildet. Zusätzlich ist die Distanz zu definieren, in der das Objekt mit ausreichender Sicherheit detektiert werden kann.

Annähern an stehendes Objekt

Die notwendige Verzögerung kann prinzipiell wie für die Annäherung an Objekte spezifiziert werden, wobei durch die fehlende Dynamik die Formel deutlich vereinfacht wird. Dennoch ist es sinnvoll, diese Verhaltensweise getrennt abzubilden, weil vor allem die Erkennung von stehenden Hindernissen ein schwierigeres Klassifikationsproblem darstellt als die Erkennung von fahrenden Fahrzeugen. Dementsprechend erscheint es wahrscheinlich, dass hierfür andere Anforderungen gestellt werden.

Reaktion auf Einscherer

Die grundsätzliche Modellierung der Einschererreaktion ist in Abschnitt 5.4.3 beschrieben.

A.7.6. Objekt passieren

Unter dieser Verhaltensweise sind hier exemplarisch zwei Anforderungen aufgehängt. Einerseits soll beim Überholen oder bei Parallelfahrt ein Mindestabstand gewährleistet sein, um auf plötzliche Querbewegungen des anderen Fahrzeugs reagieren zu können. Andererseits hat sich aus der Analyse der Risiken von Einscherern ergeben (Abschnitt 6.6.3),

dass durch unaufmerksame Ausschervorgänge anderer Fahrzeuge unvermeidbare Kollisionen hervorgerufen werden. Um diese Risiken zu verringern, ist eine Reduzierung der Relativgeschwindigkeit zu überholten Fahrzeugen denkbar. Dementsprechend wird eine allgemeine Verhaltensweise eingeführt, die nicht nur bei Einscherern, sondern generell immer bei benachbarten Fahrzeugen zu einer moderaten Reduktion der Relativgeschwindigkeit führt:

$$a_{ca} = \max\left(-\frac{v_{rel}^2 - v_{rel,min}^2}{2d_{x,ca}}, a_{ca,min}\right) \quad (\text{A.7.5})$$

Dabei wird auf jedes Fahrzeug das innerhalb von der Distanz $d_{x,ca}$ auf einem Nachbarfahrstreifen mit einer Relativgeschwindigkeit unter $v_{rel,min}$ fährt, höchstens mit der Beschleunigung $a_{ca,min}$ verzögert.

A.7.7. Hindernis ausweichen

Zur Modellierung des Ausweichmanövers wird wie in [156] die Modellierung mittels eines Polynom fünften Grades von Weber [164] übernommen. Durch Festlegung einer maximalen Querbeschleunigung $a_{y,max}$ und einer Ausweichablage y_e kann die optimale Ausweichtrajektorie folgendermaßen beschrieben werden [164, S. 71]:

$$y(x) = y_e \left(10 \left(\frac{x}{x_e} \right)^3 - 15 \left(\frac{x}{x_e} \right)^4 + 6 \left(\frac{x}{x_e} \right)^5 \right), \quad x_e = v_0 \sqrt{\frac{10y_e}{\sqrt{3}a_{y,max}}} \quad (\text{A.7.6})$$

Ergänzend können wiederum eine Latenzzeit sowie eine Erkennungsreichweite hinzugefügt werden.

A.8 Annahmen Risikomodelle

Im Rahmen der Arbeit wurden die in Tabelle A.8.1 gelisteten Risikomodelle exemplarisch in der vorgestellten Technik implementiert.

Tabelle A.8.1: Übersicht über die exemplarisch umgesetzten Risikomodelle

Konkretisierungslevel	0/1: qualitative/semi-quantitative Beschreibung	Auffahrunfall statisches Objekt Auffahrunfall statisches Objekt im Fahrstreifen Auffahrunfall auf verzögerndes Fahrzeug Auffahrunfall Einscherer Unfall bei Fahrstreifenwechsel Unfall durch Abkommen vom Fahrstreifen
	2: quantitativ parametrisch	Auffahrunfall Einscherer Auffahrunfall Einscherer mit reduzierter Relativgeschwindigkeit Auffahrunfall Einscherer mit reduzierter Relativgeschwindigkeit und Beschleunigung Auffahrunfall verzögerndes Vorderfahrzeug Auffahrunfall verzögerndes Vorderfahrzeug aufgrund Fehlfunktion Kollision mit Randbebauung Kollision mit Randbebauung probabilistisch
	3: quantitativ simuliert	Auffahrunfall Einscherer

Die in der Arbeit referenzierten Modelle basieren auf einer Reihe von Annahmen. Die wichtigsten werden für eine bessere Nachvollziehbarkeit im Folgenden dargestellt.

A.8.1. Auffahrunfall auf verzögerndes Vorderfahrzeug

Tabelle A.8.2: Annahmen des Risikomodells *Auffahrunfall auf dynamisches Objekt im FS*

Annahme/Vereinfachung	Begründung
Ausgangssituation durch Zeitlücke und Relativgeschwindigkeit modelliert	Beschränkung auf die wichtigsten physikalischen Parameter, Relativbeschleunigung aufgrund der deutlich schnelleren Dynamik bei der Ausgangssituation vernachlässigt
Definition der Wahrscheinlichkeiten der Ausgangssituationen	Exemplarische Definition
Verzögerung Vorderfahrzeug durch konstanten Geschwindigkeitsabbau über Zeit modelliert	Abweichungen durch variable Verzögerungen in erster Näherung als vernachlässigbar eingeschätzt
Verzögerungsparameter aus Stichprobe (in 6.8.1)	Verwendung exemplarischer Werte
Egogeschwindigkeit zu Systemmaximalgeschwindigkeit angenommen	Worst-Case-Abschätzung, da bei höheren Geschwindigkeiten potenziell höhere Schäden auftreten können
Objektmasse des Kollisionsgegners mit 1400 kg für Schwere-Berechnung angenommen	nicht näher begründete Annahme, leichtes Fahrzeug für höhere Schadensschere bei Kollisionsgegner

A.8.2. Auffahrunfall auf Einscherer

Am Beispiel des Auffahrunfalls auf Einscherer wird die schrittweise Konkretisierung von Risikomodelle erlauert. Demnach werden dafür Risikomodelle auf unterschiedlichen Konkretisierungsleveln referenziert.

Auf CL0 besteht das Modell in erster Linie aus der Identifikation des Risikos. Da die Bewertung auf CL0 manuell stattfindet, sind die der Bewertung zugrunde liegenden Annahmen nicht Teil des ursprünglichen Modells werden aber analog zu den anderen CL den Bewertungen zugeordnet. Die wichtigsten Annahmen des Risikomodells *Auffahrunfall auf Einscherer* auf CL0 sind in Tabelle A.8.3 dargestellt.

Tabelle A.8.3: Annahmen des Risikomodells *Auffahrunfall auf Einscherer* auf CL0

Annahme/Vereinfachung	Begründung
Jeder Einscherer mit $v_{rel} < 0$ oder $d_x < T_{min}v_{ego}$ stellt eine potenzielle Gefährdung dar	Ohne ausreichende Reaktion auf den Einscherer kommt es zu einem Auffahrunfall
ohne weitere Einschränkungen können Auffahrunfälle mit hohen Kollisionsgeschwindigkeiten auftreten -> S3 (höchste Schadensklasse), unabhängig von der Art des Kollisionspartners (Lkw, Bus, Pkw, Motorrad)	Worst-Case-Bewertung aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeiten beim Anwendungsbeispiel Autobahnchauffeur
Häufigkeit und mögliche Schadensschwere stark parameterabhängig, ohne weitere Unterteilung muss die Häufigkeit über alle Einscherer angenommen werden -> E4	Erste Worst-Case-Bewertung ohne detaillierte Analyse
Kollisionswahrscheinlichkeit: C1	Unbegründete, erste Annahme über die Systemleistungsfähigkeit

Die Modellierung des Einschererrisikos auf CL2 basiert hauptsächlich auf den Annahmen in Tabelle A.8.4.

Tabelle A.8.4: Annahmen des Risikomodells *Auffahrunfall auf Einscherer* auf CL2

Annahme/Vereinfachung	Begründung
Nur Längsdynamik ohne Berücksichtigung von Ausweichmanöver und Abbrüchen des Einschervorgangs	überschätzende Vereinfachung, da vernachlässigte Aspekte das Risiko eines Auffahrunfalls potenziell senken
Konstante Systemreaktion	Stark vereinfachte Systemreaktion mit Sprung-Verzogerungsreaktion ist als Spezifikation der Mindestreaktion zu verstehen
Vernachlässigung Reibwert	Vereinfachung durch durchschnittlichen Reibwert, benötigt Detaillierung mit begründeten Reibwerthaufigkeiten
Modellierung der Einschersituation durch Abstand d_x und Relativgeschwindigkeit dv als bedeutendste physikalische Kriterien zum Zeitpunkt des Fahrstreifenmarkierungs-ubertritts	Für die Langsdynamikbetrachtung von langsameren Einscherern unerlässliche Parameter.
Konstante Einscherergeschwindigkeit (Beschleunigung exemplarisch bei einem Modell als Konkretisierung umgesetzt)	Annahme von einer mittleren Beschleunigung von 0 m/s^2 . Besonders kritische Situationen durch verzögernde Einscherer, aber auch weniger kritische durch beschleunigte Einscherer werden damit nicht explizit berücksichtigt

Egogeschwindigkeit zu Systemmaximalgeschwindigkeit angenommen	Worst-Case-Abschätzung, weil bei höheren Geschwindigkeiten potenziell höhere Schäden auftreten können
Schadenschweremodell nur für Auffahrunfälle und Vernachlässigung von geringen Überlappungen	Detaillierte Unfallfolgenabschätzung nicht Fokus dieser Arbeit, Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeiten für geringe Überlappungen vor allem bei Integration von Ausweichbewegungen sinnvoll

Die Simulation des Risikos auf CL3 basiert prinzipiell auf denselben Annahmen wie CL2. Zusätzlich kommen Annahmen über die implementierten Rauscheffekte der Wahrnehmung und über die Aktorbeschränkungen hinzu.

A.8.3. Kollision mit Randbebauung

Die Modellierung des Kollisionsrisikos mit einer Randbebauung auf CL2 basiert auf einem Vergleich des verfügbaren und des vom System benötigten lateralen Abstands. Die relevantesten Annahmen sind in Tabelle A.8.5 gelistet.

Tabelle A.8.5: Annahmen des Risikomodells *Kollision mit Randbebauung* auf CL2

Annahme/Vereinfachung	Begründung
Abschätzung des Kollisionsrisikos durch Vergleich der spezifizierten lateralen Toleranz und des verfügbaren Abstands	Kollisionsrisiko ergibt sich bei zu großer Abweichung vom FS, Abweichungswahrscheinlichkeit in Verhaltensmodellen spezifiziert
Abstand zur Randbebauung auf Basis von Fahrstreifenanzahl und -Breite des jeweiligen Szenarios abgeschätzt	Vereinfachte, probabilistische Modellierung des Abstandes, verwendete Abmessungen aus [127], Wahrscheinlichkeiten exemplarische Schätzung
Kollisionswinkel zu 15° angenommen	Exemplarische Schätzung
Verletzungsrisiko gemäß folgender Ausführung	Siehe unten

Der potenzielle Schaden, der durch Kollisionen mit Randbebauungen entsteht, hängt stark von der Art der Randbebauung ab. Betrachtet man den WorstCase-Fall einer starren Wand, wird in [121] eine Abschätzung des Acceleration Severity Index (ASI) verwendet um über das Head Injury Criterion (HIC) auf die zu erwartenden Verletzungsschweren zu schließen. Die ASI-Werte können mit den Simulationsergebnissen von Motella [165] in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit und des Aufprallwinkels abgeschätzt werden. Eine Modellierung des Zusammenhangs zwischen ASI-Werten und HIC-Werten findet sich in [166], wobei der exponentielle Zusammenhang nach [167] verwendet wird. Aus den HIC-Werten lässt sich eine Verbindung zu Verletzungsschweren herstellen [168, 169]. Offensichtlich behandelt diese Herleitung lediglich Kopfverletzungen. Damit soll jedoch die Integration von vorhandenen Modellen aus der Unfallforschung veranschaulicht werden.

In den allermeisten Fällen sind jedoch an Autobahnen keine starren Wände, sondern speziell ausgelegte Rückhaltesysteme installiert. Diese sind nach Aufhaltestufen gegliedert, beispielsweise im Mittelstreifen Aufhaltestufe H2 und außen je nach Gefährdung durch Hindernisse H1 oder N2 [170]. H1 und H2 sind für das Rückhalten von LKW mit 10 Tonnen bei 70 km/h und 15 Grad Anprallwinkel ausgelegt [171]. N2 ist bezüglich einer Kollision mit einem 1500 kg schweren Pkw bei 110 km/h und 20 Grad Anprallwinkel geprüft [171]. Unter der Annahme, dass die Rückhaltesysteme abhängig von der kinetischen Energie standhalten,

kann in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse die entsprechende Grenzggeschwindigkeit abgeleitet werden. Demnach sind durch die Kollision mit der Randbebauung bei diesen Geschwindigkeiten aufgrund der kontrollierten Anprallstufe maximal leichte Verletzungen zu erwarten und die obere Verletzungsabschätzung damit zu konservativ. Jedoch könnten durch das Abprallen von dem Rückhaltesystem gefährliche Folgekollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern entstehen. In Ermangelung von umfangreichen Unfalldaten ist dieses Risiko schwer abzuschätzen. Aufgrund des beschränkten Abprallbereichs von maximal ca. 5 Metern (2,2 m + Fahrzeugbreite +16 % der Fahrzeuglänge [171, S. 15]) wird dieses Risiko jedoch eher gering eingeschätzt.

A.9 Abbruchkriterium Monte Carlo Simulation

Exemplarisch wird hier die Simulation der eingeführten Parameterverteilungen für die Einschereberechnung beendet, sobald sich die Kollisionswahrscheinlichkeit innerhalb von 100 aufeinanderfolgenden Durchläufen um weniger als 1% ändert (Abb. A.9.1). Dabei werden in jedem Durchlauf Zufallswerte entsprechend der Wahrscheinlichkeitsverteilungen gezogen und auf den gültigen Parameterbereich reduziert, wodurch sich eine wechselnde Anzahl an Einzelberechnungen ergibt.

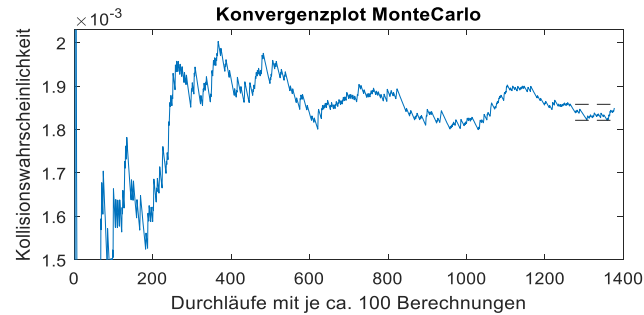


Abb. A.9.1: Konvergenzverlauf der Kollisionswahrscheinlichkeit der Einscherrisikoberechnung

A.10 Abdeckungsfaktoren

Die in dieser Modellierung abgebildeten Szenarien überlappen sich aufgrund des Szenarienmodellierungskonzepts. Die einzelne Bewertung jedes modellierten Szenarios würde in einer aufsummierten Gesamtbewertung zu einer mehrfachen Berücksichtigung dieser Überlappungen führen. Generell sind bei der hier entwickelten Technik die einzelnen Risiken in den Szenarien-Verhaltenskombinationen die relevantesten Ergebnisse. Für eine gezielte Risikoreduktion ist es jedoch notwendig, die größten Risikobeiträge identifizieren zu können. Da jedoch hohe Risikowerte häufig aufgrund von groben Worst-Case-Abschätzungen stammen, sollten diese Werte nach erfolgter Detaillierung durch genauere Szenarien oder Modelle nicht mehr in der Übersicht auftauchen.

Generell gibt es zwei Arten von relevanten Überschneidungen. Einerseits werden Szenarien immer weiter detailliert, wodurch die detaillierteren Szenarien jeweils einen Teil des übergeordneten Szenarios bereits abdecken. Andererseits werden die Risikomodelle anhand ihrer Relevanz sukzessive detailliert und überschneiden sich demnach ebenfalls mit ihren Elternmodellen.

Der Szenarienabdeckungsfaktor δ_{sc} dient dazu, die Risikoanteile eines abstrakteren Szenarios auszublenden, wenn diese bereits in einem spezialisierteren berücksichtigt sind. Dieser Faktor hängt allerdings nicht am Wahrscheinlichkeitsverhältnis der Szenarien, sondern am Verhältnis der risikorelevanten Anteile. Deshalb wird der Faktor als Verhältnis der berechneten Risiken R eines Risikomodells rm_k im detaillierteren Szenario sc_j zum Szenario sc_i gebildet:

$$\delta_{sc,j \rightarrow i|k} = \frac{R_{j,k}}{R_{i,k}} \quad (\text{A.10.1})$$

Beispielsweise kann zur detaillierteren Analyse von Einschererrisiken ein Szenario speziell für kritische Naheinscherer erstellt werden. Obwohl dieses Spezialszenario nur einen Bruchteil der Szenarienhäufigkeit aufweist, kann es den Großteil der Risiken abdecken (Abb. A.10.1).

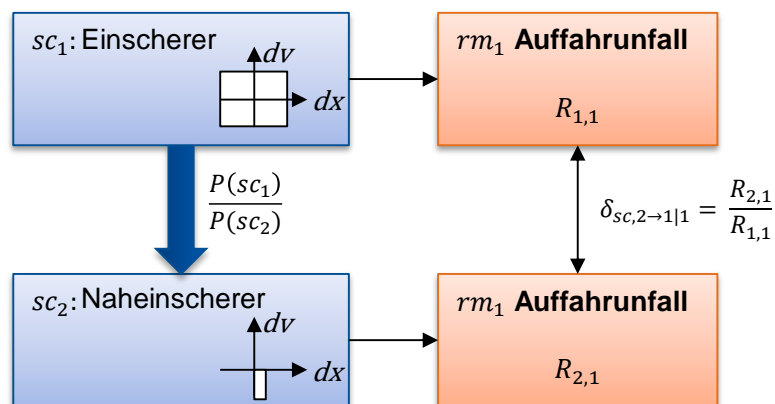


Abb. A.10.1: Veranschaulichung Szenarienabdeckungsfaktor

Die zweite Abdeckungskategorie wird durch den Risikoabdeckungsfaktor δ_{rm} beschrieben. Gibt es ein spezialisiertes Risikomodell rm_l , das ebenfalls auf das betrachtete Szenario passt, wird das übergeordnete Risikomodell rm_k komplett ersetzt ($\delta_{rm,l \rightarrow k} = 1$).

Bei konkretisierten Risikomodellen rm_{l_c} hängt die Abdeckung von den betrachteten Szenarien ab. Deshalb ist nur bei vollständiger Konkretisierung eines Risikomodells durch untergeordnete Modelle $\sum_{l_c} \delta_{l_c \rightarrow k} = 1$ die Abdeckung allgemeingültig. In den anderen Fällen

dient der Faktor zu einer qualitativen Abdeckung der früheren Abschätzungen und muss in Abhängigkeit der relevanten Szenarien geprüft werden.