

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Situationsanalyse und Entscheidungsfindung bei automatisiertem Fahren im urbanen Verkehr unter Berücksichtigung von Verkehrsregeln und Gefahren

Sabine Krause

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch
2. Prof. Dr. Mark Vollrath, Technische Universität Braunschweig

Die Dissertation wurde am 15.07.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt am 15.10.2020 angenommen.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt an dieser Stelle meinem Doktorvater Fritz Busch. Ich danke insbesondere für die ausführlichen Diskussionen zu dieser Arbeit, aber auch für die vielen Freiheiten und Möglichkeiten, die mir während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik gegeben wurden.

Für die Co-Betreuung möchte ich mich bei Mark Vollrath bedanken. Außerdem danke ich Klaus Bogenberger für die Übernahme des Vorsitzes und die wertvollen Ratschläge in der Vorbereitung auf die Prüfung.

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik entstanden. Ich danke meinen Kollegen für die konstruktiven Diskussionen und Unterstützung sowohl fachlich als auch außerhalb der Arbeit. Insbesondere danke ich Silja Hoffmann, die mir als Mentorin immer wieder wertvolle Hinweise geben konnte. Allen Kollegen danke ich für die tolle freundschaftliche Atmosphäre, die das Arbeiten am Lehrstuhl besonders gemacht haben.

Des Weiteren danke ich den Studenten, die während der letzten Jahre mit mir zusammengearbeitet haben und im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Der Großteil dieser Arbeit ist durch Forschungsprojekte ermöglicht worden. Ich danke insbesondere der BMW Group für die Kollaboration im Car@TUM Projekt.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die Unterstützung, vor allem aber auch Ablenkung während der letzten Jahre. Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich während des gesamten Studiums unterstützt haben. Richard danke ich dafür, dass er mir so liebevoll zur Seite gestanden hat.

Kurzfassung

Das automatisierte Fahren ist derzeit eines der zentralen Forschungsthemen in der Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Viele automatisierte Fahrsysteme sind bereits heute in Fahrzeugen vorhanden. Sie reichen von rein informierenden Systemen, die den Fahrzeugführer beim Fahren lediglich unterstützen, bis hin zu Systemen, die die Fahraufgabe in einigen Anwendungsfällen komplett übernehmen. Fokus aktueller Forschungsaktivitäten ist das sogenannte vollautomatisierte Fahren, wobei die Fahraufgabe während der gesamten Fahrt vom System übernommen wird und kein Fahrer mehr als Rückfallebene benötigt wird.

Die Entwicklung und Zulassung solcher Systeme für öffentliche Straßen bringt jedoch große Herausforderungen mit sich, insbesondere da die Verkehrs- und Verhaltensregeln für das Fahren eines Fahrzeugs auf öffentlichen Straßen für menschliche Fahrer ausgelegt sind. Die Verkehrsregeln verlangen die korrekte Erkennung und Interpretation relevanter Merkmale einer Fahrsituation. Bei der darauf aufbauenden Entscheidung für ein Fahrmanöver müssen Fahrer auf Wissen darüber zurückgreifen, welche Regeln bei Vorhandensein bestimmter Merkmale eingehalten werden müssen und auf welche Gefahren zu achten ist.

Die vorliegende Arbeit widmet sich dem Problem der Situationserkennung und -interpretation, dem Aufbau einer Wissensbasis zu Verkehrsregeln und -konflikten und der Entscheidungsfindung für regelkonforme Fahrmanöver für das Fahren im urbanen Verkehr. Dafür werden die beschreibenden Merkmale aus Situationskatalogen und Unfalldatenbanken in die Wissensbasis aufgenommen, die die Verkehrsregeln bzw. -konflikte in Fahrsituationen beinhalten. Die daraus resultierende Beschreibungsform wird zur Validierung auch auf eigens erhobene Daten von Befahrungen angewandt.

Basierend auf einer entsprechend entwickelten Klassifikationsmethodik werden den realen Fahrsituationen relevante Verkehrsregeln und potenzielle Konflikte zugeordnet. Da aus dieser Zuordnung allein nicht immer eindeutig ein Fahrmanöver abgeleitet werden kann, wird die Wissensbasis, unter Zuhilfenahme der generischen Formulierungen aus den Verkehrsregeln, um zusätzliche Attribute erweitert. Dazu gehören beispielsweise Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen verschiedenen Fahrzeugen in einer Situation. Diese Attribute sind allerdings nicht immer quantitativ definiert, sondern werden als unscharfe Mengen ausgedrückt. Die resultierenden WENN-DANN Formulierungen stellen Fahrstrategien für das taktische Fahrverhalten dar. Fuzzylogik wird dazu verwendet, aus den Regelformulierungen mit unscharfen Mengen Handlungsempfehlungen für das Fahrverhalten des Fahrzeugs abzuleiten. Um die Sinnhaftigkeit und die Umsetzbarkeit des entwickelten Vorgehens zu zeigen, wird es auf beispielhafte Fahrsituationen angewendet.

Schließlich werden diese Beispielsituationen, die aus den realen Befahrungsdaten extrahiert wurden, hinsichtlich ihrer Kritikalität untereinander verglichen. Dafür fließen die Merkmale der zu beachtenden Verkehrsregeln und potenziellen Konflikte in eine multidimensionale Bewertung der Kritikalität ein.

Die Arbeit zeigt eine Methodik, mit der die Automatisierung des Verkehrs weiter vorangetrieben werden kann. Sie leistet insbesondere einen Beitrag zum Verständnis von Fahrsituationen und -aufgaben im urbanen Verkehr.

Abstract

Automated driving is currently one of the key research topics in vehicle and traffic engineering. Various automated systems are already deployed in today's vehicles. These range from systems that provide information and thereby only support the driver in the driving task to systems that take over control of the vehicle in specific use cases. Current research focuses on fully automated driving systems, which can take over the driving task during the entire trip and do not need a driver as a fallback.

The development and approval of such systems for public roads is still a major challenge, particularly because the rules of traffic and conduct for driving on public roads are made for humans and require the proper detection and interpretation of relevant characteristics of the driving situation. When deciding on a proper driving maneuver based on this interpretation, drivers need to rely on knowledge about rules to apply and hazards to watch out for depending on the characteristics of the situation.

This dissertation is dedicated to the problem of the situation recognition and interpretation, establishing a knowledge base of traffic rules and conflicts, and decision making for compliant driving maneuvers for driving in urban areas. Through the analysis of data that describe traffic rules and conflicts, the relevant characteristics are extracted. The resulting description format for driving situations is also used for self-collected driving data.

By means of classification, relevant traffic rules and potential conflicts are assigned to each situation from the real driving data. Since the extraction of a correct driving maneuver purely from data matching is not always possible, the knowledge base is extended by adding information from traffic rule formulations. This is mostly dynamic information, such as speed differences between vehicles in the situation. Traffic rules are typically formulated generically, therefore, the attributes are not quantitatively defined, but rather use fuzzy sets. The resulting IF-THEN formulations represent driving strategies on a tactical level. Fuzzy logic is used to derive appropriate driving behaviors from the fuzzy rules. The developed procedure is applied to examples of real driving situations in order to test the feasibility.

Finally, the example driving situations are compared among each other with regard to their criticality. To this end, the data on relevant attributes about the traffic rules and conflicts acquired for this work, are included into a multidimensional assessment of the criticality of driving situations.

The thesis shows a methodology that promotes automated traffic. In particular, it contributes to the understanding of driving situations and tasks in urban traffic.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Eingrenzung der Themenstellung und Forschungsfragen	2
1.3	Methodischer Ansatz und Aufbau der Arbeit	3
2.	Stand des Wissens	7
2.1	Begriffe der Situationsbeschreibung.....	7
2.1.1	Szene und Szenario	7
2.1.2	Fahr- und Verkehrssituation	9
2.1.3	Anwendungsfall (Use Case)	13
2.2	Fahrverhalten und Verkehrsgeschehen.....	14
2.2.1	Kommunikation zwischen Fahrern.....	16
2.2.2	Verkehrsregeln und normatives Fahrverhalten	17
2.2.3	Verkehrsunfallgeschehen	20
2.2.4	Kritikalität von Fahrsituationen.....	23
2.3	Automatisiertes Fahren	25
2.3.1	Sensorik automatisierter Fahrzeuge	28
2.3.2	Umfeldmodell automatisierter Fahrzeuge	31
2.3.3	Fahrstrategie automatisierter Fahrzeuge	32
2.3.4	Pfad- und Trajektorienplanung automatisierter Fahrzeuge	34
2.3.5	Fahrzeugführung automatisierter Fahrzeuge	36
2.3.6	Automatisierte Fahrfunktionen – Stand der Entwicklung.....	37
2.3.7	Zulassung und Absicherung von automatisierten Fahrzeugen.....	38
2.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	40
3.	Beschreibungsform für urbane Fahrsituationen	43
3.1	Elemente der Situationsbeschreibung	43
3.1.1	Relation von Fahrmanövern	45
3.1.2	Darstellung und Beschreibung der Infrastruktur.....	48
3.2	Beschreibung von situationsspezifischen Verkehrs- und Verhaltensregeln	49
3.2.1	Relevanz von Komponenten.....	52
3.3	Beschreibung von Verkehrsunfallsituationen.....	53
3.4	Struktur der Datenbank und grafische Benutzeroberfläche	55
3.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	57
4.	Datenanalyse der Fahr- und Unfallsituationen im Testgebiet	59
4.1	Vorstellung der Testrouten	59
4.1.1	Analyse von Verkehrsunfällen im Untersuchungsgebiet München Nord	60

4.2 Zuordnung von Fahrsituationen zu Verkehrsregeln und Gefahren.....	63
4.2.1 Klassifikation von Fahrsituationen mittels Data Matching.....	65
4.2.2 Zuordnung von Fahrsituationen zu Verkehrsregeln.....	68
4.2.3 Zuordnung von Fahrsituationen zu Unfallsituationen und Konflikten	71
4.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	74
5. Entscheidungsfindung für regelkonformes Fahrverhalten	77
5.1 Grundlagen der Fuzzylogik.....	77
5.1.1 Die Theorie unscharfer Mengen.....	79
5.1.2 Fuzzy Regeln und Inferenzsysteme	82
5.2 Anwendung der Fuzzylogik zur Entscheidungsfindung bei der Auswahl einer Fahrstrategie	86
5.2.1 Definition unscharfer Mengen aus Verkehrsregeln	86
5.2.2 Definition der Regelbasis und Inferenzsystem zur Verhaltensentscheidung auf Basis von Verkehrsregeln	92
5.2.3 Diskussion	100
5.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	101
6. Multidimensionale Bewertung der Kritikalität von urbanen Fahrsituationen	103
6.1 Kritikalität einer Fahrsituation	103
6.2 Bewertungsmethodik.....	105
6.3 Anwendung der Bewertungsmethodik auf exemplarische Fahrsituationen	108
6.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	110
7. Zusammenfassung, kritische Würdigung und Ausblick	111
7.1 Zusammenfassung.....	111
7.2 Kritische Würdigung	113
7.3 Ausblick.....	114
Literaturverzeichnis.....	117
Abkürzungsverzeichnis	127
Abbildungsverzeichnis	129
Tabellenverzeichnis	131
Anhang 1: Überblick Datenbank Fahrsituationen	133
Anhang 2: Beispielimplementierung Data Matching	135
Anhang 3: Beispielimplementierung Fuzzy System.....	137

1. Einleitung

Dieses Kapitel der Arbeit soll zunächst in die Themenstellung der Arbeit einführen und so relevante Forschungsfragen identifizieren. Nachdem die Motivation und die grundlegenden Forschungsfragen aufgezeigt sind, wird die in dieser Arbeit verwendete Methodik erläutert und der Aufbau der Arbeit vorgestellt.

1.1 Motivation

In den vergangenen Jahrzehnten entwickelt sich die Fahrzeugtechnik mit rasanter Geschwindigkeit. Mehr und mehr Sensoren und Steuergeräte halten Einzug in die Fahrzeuge und ermöglichen damit verschiedenste Funktionen, die darauf abzielen, die Fahr- und Verkehrssicherheit zu verbessern, die Fahreffizienz zu steigern oder den Fahrkomfort zu erhöhen. Insbesondere im Bereich der Fahrerassistenz gibt es viele neuartige Funktionalitäten. Auf Grund ihres nachgewiesenen positiven Nutzens, müssen einige Systeme bereits verpflichtend in neue Fahrzeuge verbaut werden. Zusätzlich befinden sich bereits Funktionen in der Entwicklung, die dem Fahrer die Fahraufgabe in einigen Situationen komplett abnehmen sollen. Das sogenannte automatisierte Fahren ist für Autobahnen bereits für etliche Anwendungsfälle entwickelt, erprobt und in Fahrzeugen verfügbar. Als weiterer Schritt soll nun auch automatisiertes Fahren im städtischen Verkehr ermöglicht werden. Der Verkehr in der Stadt ist weitaus komplexer, da im Stadtverkehr eine Vielzahl unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer, Infrastrukturen und Regeln beachtet werden müssen. Soll diese Fahraufgabe automatisiert werden, so muss das System im Fahrzeug jegliche Fahrsituationen erkennen, korrekt interpretieren und vorher-sagen können. Es muss stets eine adäquate Fahrstrategie gefunden werden und ein sinnvolles Manöver ausgeführt werden. Das bedeutet, dass stets die Verkehrsregeln eingehalten werden müssen und gleichzeitig größtmögliche Sicherheit für das Fahrzeug und den Verkehr garantiert werden muss.

Damit automatisierte Fahrzeuge akzeptiert werden, müssen sie sich, vor allem im Mischverkehr aus automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern, adäquat entsprechend der Verkehrssituation und vorhersehbar für andere Verkehrsteilnehmer verhalten, insbesondere aber stets Sicherheit für Insassen und Umfeld gewähren. Das Verhalten entsprechend der geltenden Rechtsnormen hat für automatisierte Systeme hohe Priorität. Beim Fahren auf öffentlichen Verkehrswegen in Deutschland sind dafür die Verkehrsregeln der Straßenverkehrsordnung die Grundlage. Da diese Regeln für Menschen geschaffen sind, sind sie in vielen Teilen allerdings nicht eindeutig, sondern beinhalten unscharfe Formulierungen, die von den Verkehrsteilnehmern interpretiert werden müssen. Für technische Systeme, die auf Basis programmierter Regeln handeln, stellt dies eine Schwierigkeit dar. Um automatisierte Fahrsysteme für den Verkehr auf öffentlichen Straßen zuzulassen, muss nachgewiesen werden, dass das System stets in der Lage ist, die Verkehrsregeln einzuhalten und ein entsprechend konformes Manöver zu wählen. Beim Sicherheitsnachweis solcher Systeme

wird nicht nur die Reaktion auf Systemausfälle getestet, es muss auch nachgewiesen werden, dass die Sollfunktion bereits sicher ist.

In der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen für den urbanen Verkehr müssen Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten, wie beispielsweise die Sensorik, genau definiert werden. Diese ergeben sich aus dem Sollverhalten des Systems in den einzelnen Situationen, die das System beherrschen können muss. Wenn das System im kompletten städtischen Umfeld funktionieren soll, ist das Auflisten aller erdenklicher Situationen jedoch nur schwer handhabbar. Es stellt sich die Frage, wie die Fahrsituationen des urbanen Verkehrs systematisch beschrieben werden können, um jeweils relevante Verkehrsregeln und Gefahren zu identifizieren. Weiterhin muss geklärt werden, wie sich daraus eine Fahrstrategie ableiten lässt, die das Einhalten der geltenden Verkehrsregeln sicherstellt.

1.2 Eingrenzung der Themenstellung und Forschungsfragen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Fahrsituationen in städtischen Gebieten. Das Stadtgebiet ist besonders interessant, da hier eine Vielzahl verschiedener Situationen auftreten können. In verschiedenen Fahrsituationen sind auch verschiedene Verkehrsregeln zu berücksichtigen. Eine strukturierte Wissensbasis über die in jeder Situation geltenden Regeln fehlt bisher. In der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen ist das eine Herausforderung, da der Umfang möglicher Anwendungsfälle für das Fahren im Stadtgebiet nicht klar definiert und abgegrenzt werden kann. Somit stoßen außerdem aktuelle Zulassungsprozesse an ihre Grenzen, die die Beschreibung der Anwendungsfälle und das Sollverhalten des automatisierten Systems im jeweiligen Fall fordern.

Das automatisierte Fahren im städtischen Verkehr ist im Fokus aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Es ist besonders für Anbieter neuartiger Mobilitätsdienstleistungen von Interesse, die Fahrdienste im urbanen Raum anbieten. Das Potenzial solcher Dienste wird allerdings erst ausgeschöpft, wenn kein Fahrer mehr benötigt wird. Wenn innerhalb dieser Arbeit automatisierte Fahrzeuge thematisiert werden, werden daher stets solche Systeme betrachtet, deren Einsatzbereich (die sog. Operational Design Domain, ODD) der komplette urbane Raum ist, wobei kein menschlicher Fahrer mehr als Rückfallebene zur Verfügung steht. Diese Definition entspricht mindestens dem Level 4 nach SAE-Einteilung [SAE INTERNATIONAL 2018].

Die Arbeit befasst sich mit der Frage, welche Fahrsituationen die Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens im urbanen Verkehr darstellen. Es soll eine Methodik entwickelt werden, mit der es ermöglicht wird, aus Fahrsituationen im urbanen Verkehr die entsprechenden Verkehrsregeln und Gefahren zu identifizieren. Die Verkehrsregeln beziehen sich dabei auf die in Deutschland auf öffentlich Straßen geltenden Regeln der Straßenverkehrsordnung. Gefahren werden im Sinne der in der Situation bestehenden Konflikte und daraus potenziell entstehenden Verkehrsunfälle betrachtet. Dadurch soll auch ermöglicht werden, regelkonforme Fahrstrategien für die jeweiligen Fahrsituationen zu formulieren. Die Ergebnisse der Arbeit können dazu dienen, Anforderungen an die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge zu formulieren

bzw. die Entwicklung einzelner Funktionen und Komponenten zu priorisieren. Außerdem können die Ergebnisse in die Entwicklung der Fahrstrategie der Fahrzeuge einfließen und in der Absicherung und Zulassung Anwendung finden. Es ergeben sich somit die folgenden Fragestellungen, die innerhalb der Arbeit beantwortet werden sollen:

- Wie können Fahrsituationen im urbanen Raum umfassend und einheitlich beschrieben werden?
- Wie wird regelkonformes Fahrverhalten in den verschiedenen Situationen definiert?
- Wie kann aus einer Fahrsituation abgeleitet werden, welche Konflikte bestehen?
- Wie kann eine regelkonforme und Gefahren berücksichtigende Fahrstrategie für automatisierte Fahrzeuge in den verschiedenen Situationen identifiziert werden?

Innerhalb der Arbeit wird eine Methodik entwickelt, urbane Fahrsituationen zu analysieren und zu klassifizieren. Somit können urbane Fahrsituationen beschrieben werden und jeder Situation entsprechende Konflikte und anzuwendende Verkehrsregeln zugeordnet werden. Auf Basis der Detailanalyse einiger Testfälle, wird die Methodik für Situationen in ausgewählten Testgebieten exemplarisch angewendet. Das in der Arbeit entwickelte Vorgehen kann für die Priorisierung bei der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen für das Fahren im urbanen Raum dienen. Außerdem ist es dabei behilflich, Anforderungen an die Komponenten und das Verhalten automatisierter Fahrzeuge zu ermitteln.

1.3 Methodischer Ansatz und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, automatisiertes Fahren im urbanen Verkehr voranzutreiben. Dabei wird die Problematik der Eingrenzung der möglichen Anwendungsfälle, die in der Entwicklung, Absicherung und Testung automatisierter Fahrzeuge besteht, adressiert. Außerdem werden konkrete Ansätze zur Entwicklung automatisierten Fahrens für den Stadtverkehr gegeben, insbesondere in Bezug auf Algorithmen der taktischen Entscheidungsfindung. Durch die in der Arbeit verwendeten und aufbereiteten Daten wird dem Fahrzeug eine Wissensbasis zu Verfügung gestellt, die es ermöglicht, Regeln und Konflikte zu identifizieren und entsprechende Verhaltensanweisungen zu generieren. Ähnlich wie bei menschlichen Fahrern in der theoretischen Führerscheinprüfung, kann dies auch für den Nachweis der korrekten Entscheidungsfindung im Zulassungsprozess verwendet werden.

Methodisch wird dabei wie folgt vorgegangen: Zunächst wird innerhalb einer umfassenden Literaturrecherche (Kapitel 2) dargelegt, wie urbane Fahrsituationen beschrieben werden können und welche Ansätze es gibt, dies zu vereinheitlichen. Diese Betrachtungen sind aktuell insbesondere vor dem Hintergrund noch fehlender Methoden für das Testen und Absichern von automatisierten Fahrzeugen von großem Interesse. Des Weiteren wird auf das Fahrverhalten im urbanen Verkehr sowie die Verkehrsregeln und Konflikt- und Unfallsituationen eingegangen. Auch das automatisierte Fahren selbst wird innerhalb der Literaturrecherche adressiert. Hierbei wird auf die Komponenten, die für automatisierte Fahrzeuge eine Rolle spielen,

eingegangen und es werden aktuelle Entwicklungen und Methoden dargelegt. Insbesondere werden auch rechtliche Rahmenbedingungen und aktuelle Vorgehen bei der Zulassung und Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen betrachtet. Es werden jeweils die Grenzen der aktuellen Verfahren dargelegt und Forschungslücken aufgezeigt.

Im darauffolgenden Schritt werden Daten erhoben und aufbereitet (Kapitel 3). Hierbei handelt es sich um dreierlei Quellen. Die erste Datenquelle umfasst Fahrsituationen aus realem Verkehr, welche durch Befahrungen in städtischen Umgebungen aufgezeichnet wurden. Des Weiteren wurden die in Deutschland geltenden Verkehrsregeln der Straßenverkehrsordnung analysiert sowie Fahrsituationen, die als Beispiele für die jeweiligen Verkehrsregeln dienen, strukturiert erfasst. Als dritte Datenquelle werden Unfalldaten verwendet, die als Vertreter für Gefahrensituationen dienen. Ein Unfalltypenkatalog wird verwendet, um die Konflikte, aus denen die Unfälle entstehen, zu klassifizieren. Basierend auf der Literatur werden die Datenquellen in ein standardisiertes Format übertragen, sodass jeweils die gleichen Merkmale auf dieselbe Art und Weise beschrieben werden. Es wird eine Datenbankstruktur verwendet, die alle drei Datenquellen enthält und untereinander in Verbindung setzen kann.

Der darauffolgende methodische Teil der Arbeit befasst sich damit, die Fahrsituationen aus dem realen Verkehr genauer zu analysieren und sie den entsprechenden Verkehrsregeln sowie Konfliktsituationen zuzuordnen (Kapitel 4). Dazu wird eine Klassifikation entwickelt, welche identifiziert, ob die relevanten Merkmale der verschiedenen Datenquellen übereinstimmen. Anschließend soll für jede Fahrsituation eine passende Fahrstrategie gefunden werden, welche entsprechend der Verkehrs- und Verhaltensregeln ist (Kapitel 5). Dafür wird die Wissensbasis zunächst um zusätzliche Attribute aus den Formulierungen der Verkehrsregeln erweitert. Die Beschreibungen in den Verkehrsregeln sind jedoch zumeist nicht konkret quantitativ formuliert, sondern werden durch unscharfe Mengen ausgedrückt. Fuzzylogik erlaubt es, aus der unscharfen Regelbasis konkrete, für Maschinen interpretierbare Entscheidungen abzuleiten. Dazu wird ein entsprechendes System aufgebaut und mit beispielhaften Fahrsituationen aus dem Realverkehr getestet.

Urbane Fahrsituationen können stets eine Vielzahl unterschiedlicher Konflikte beinhalten und auch das Einhalten mehrerer Verkehrsregeln verlangen. Unter Zuhilfenahme der zuvor analysierten Daten wird die Kritikalität unterschiedlicher Fahrsituationen verglichen. Dazu wird eine Methode für die multidimensionale Bewertung der Kritikalität vorgeschlagen (Kapitel 6). Im abschließenden Kapitel 0 werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen gegeben. Die Abbildung 1.1 gibt das gesamte Vorgehen übersichtlich wieder.

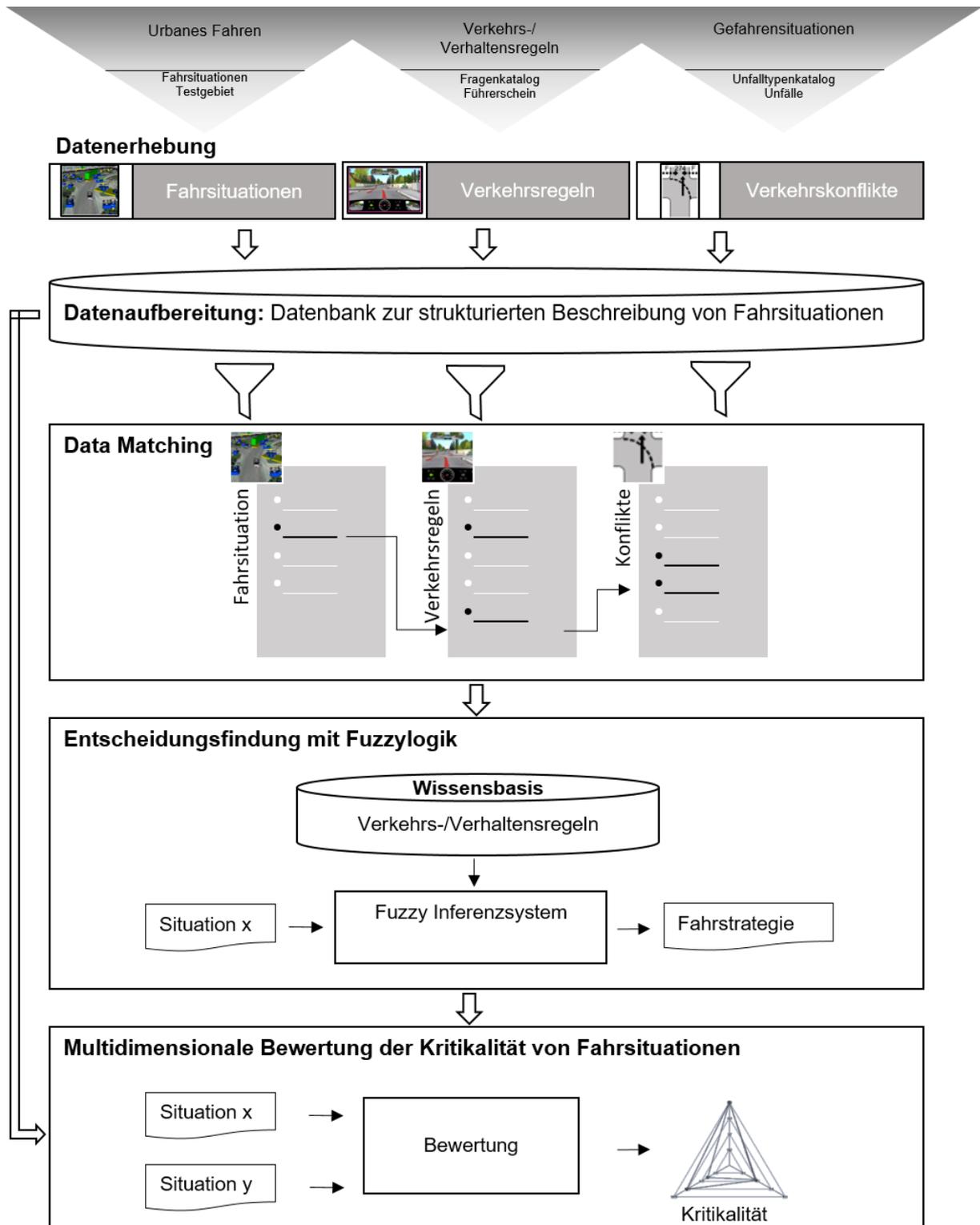


Abbildung 1.1: Übersicht über das methodische Vorgehen der Arbeit

2. Stand des Wissens

Innerhalb dieses Kapitels wird die relevante Literatur zu den verschiedenen in dieser Arbeit behandelten Themengebieten zusammengefasst. Hierfür werden zunächst einige Begriffe definiert, die im Laufe der Arbeit Verwendung finden (Kapitel 2.1). Insbesondere wird dabei der Begriff *Fahrsituation* abgegrenzt. Weiterhin enthält Kapitel 2.2 relevante Literatur zur Beschreibung von Fahrverhalten und des Verkehrsgeschehens. Dabei wird vor allem auf Verkehrsregeln und menschliches Fahrverhalten und die Besonderheiten in einigen Fahrsituationen, sowie auf das Verkehrsunfallgeschehen eingegangen. Kapitel 2.3 beschäftigt sich mit dem automatisierten Fahren und stellt die Funktionsweisen und Komponenten automatisierter Fahrfunktionen sowie die aktuellen Entwicklungen und rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich des vollautomatisierten Fahrens in urbanen Umgebungen dar.

2.1 Begriffe der Situationsbeschreibung

Insbesondere die Begriffe *Situation*, *Anwendungsfall* und *Szenario* werden innerhalb der Arbeit des Öfteren verwendet, dieser Abschnitt dient dazu, die einzelnen Begriffe zu definieren und klar voneinander abzugrenzen. In GEYER ET AL. [2014] wird weiter zwischen den Begriffen *Szenerie*, *Szene* und *Szenario* unterschieden. Bei dem Begriff *Situation* wird unterschieden zwischen *Fahr-* und *Verkehrssituation*. In den folgenden Abschnitten werden also die Begriffe *Szene* und *Szenario* (vgl. Abschnitt 2.1.1) sowie *Situation*, unterschieden nach *Fahr-* und *Verkehrssituation* (vgl. Abschnitt 2.1.2) eingeführt und definiert. Des Weiteren werden bei der Entwicklung technischer Systeme, wie dem automatisierten Fahren, *Anwendungsfälle*, sogenannte *Use Cases* definiert. Auch dieser Begriff soll im Abschnitt 2.1.3 abgegrenzt werden.

2.1.1 Szene und Szenario

Das Wort *Szene* kommt aus dem Griechischen und bedeutet Bühne [PFEIFER ET AL. 1993]. In GEYER ET AL. [2014] wird bei der Beschreibung von Szenen im Verkehr die Metapher zum Theater verwendet und definiert, dass die Szene eine *Szenerie* enthält, die, ähnlich wie dem Bühnenbild, alle statischen Elemente beinhaltet. Zusätzlich dazu enthält die Beschreibung einer Szene dynamische Elemente sowie, auf das Fahren bezogen, Fahrhinweise. Auch ULBRICH ET AL. [2015] unterscheiden diese Begriffe und definieren eine Szene als eine *Momentaufnahme des Umfeldes*. Sie beinhaltet alle dynamischen Objekte sowie deren Zustände, die Szenerie, welche statische Objekte sowie weitere Informationen zur Umwelt beinhaltet und die Eigenrepräsentation der Akteure, aus deren Perspektive die Szene betrachtet wird. Eine Szene ist immer subjektiv, da sie aus der Betrachtungsweise eines Akteurs dargestellt wird. Auch Informationen zu den Fähigkeiten und Einschränkungen des Beobachters der Szene gehören zu deren Beschreibung. Beispielsweise schränkt das Sichtfeld die Wahrnehmungsmöglichkeit der Szene ein.

Als weiterer Begriff wird in ULBRICH ET AL. [2015] das *Szenario* definiert. Hierbei spielt die Zeit eine entscheidende Rolle. Während eine Szene eine Momentaufnahme ist, beschreibt ein Szenario die *zeitliche Entwicklung zwischen mehreren Szenen*, bzw. eine Sequenz von Szenen. Alle Handlungen und Ereignisse gehören somit zur Beschreibung von Szenarien. Ein Szenario kann mehrere Szenen beinhalten. Nutzt man die Metapher des Theaters, könnte das Szenario als die Handlung des Theaterstücks beschrieben werden [ULBRICH ET AL. 2015].

BAGSCHIK ET AL. [2017] definieren mehrere Abstraktionsgrade für die Beschreibung von Szenarien im Verkehr. Das *funktionale Szenario* ist dabei die Beschreibung mit dem niedrigsten Detailgrad, welches keinerlei Informationen zu Parameterwerten wie Geschwindigkeiten oder exakte Positionen von den Fahrzeugen in der Szene enthält. Das *logische Szenario* konkretisiert dies etwas, indem auch Bandbreiten der Parameterwerte angegeben werden. Ein *konkretes Szenario* enthält die Beschreibung mit dem höchsten Detaillierungsgrad: Es werden alle Parameterwerte spezifiziert um beispielsweise eine automatisierte Fahrfunktion zu testen. Es wird also aus dem Parameterraum, der im logischen Szenario aufgespannt wurde, eine konkrete Kombination von Parametern ausgewählt.

Ein Szenario im Kontext des Fahrens im urbanen Bereich, kann beispielsweise das Überqueren eines lichtsignalgesteuerten Knotenpunktes sein. Dieses Szenario kann allerdings in mehrere einzelne Situationen enthalten [GEYER ET AL. 2014], wie dem Zufahren auf einen signalisierten Knotenpunkt, dem Warten an einem roten Signalgeber und dem Überfahren eines Knotenpunktes an einem grünen Signalgeber. Soll dieses Szenario als *konkretes Szenario* definiert werden, würden in der Beschreibung beispielsweise Informationen zum Geschwindigkeitsverlauf des betrachteten Fahrzeugs, Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern und weitere Parameterwerte enthalten sein. Dieses Szenario, bestehend aus verschiedenen Situationen, spielt sich in derselben Szene ab, dem Knotenpunkt. Zum Begriff Situation, in der das betrachtete Fahrzeug eine bedeutende Rolle spielt, folgen in Kapitel 2.1.2 weitere Betrachtungen. Der Metapher des Theaters folgend, betritt in einer Situation ein Akteur die Bühne, welcher eine bestimmte Handlung ausführt [GEYER ET AL. 2014].

In STELLET ET AL. [2015] werden zwei Herangehensweisen präsentiert, um Szenarien für automatisiertes Fahren zu identifizieren: die datengetriebene und die wissensbasierte Herangehensweise. Die meisten der zuvor genannten Arbeiten verwenden wissensbasierte Methoden. Sie versuchen ganzheitliche Beschreibungen aus dem Wissen über die möglichen Ausprägungen der Merkmale, die die Szenen beschreiben, abzuleiten. Im Gegensatz dazu werden im sogenannten datengetriebenen Ansatz empirische Daten, wie Unfalldaten oder Daten aus Testfahrten, verwendet, um Szenarien zu definieren. Sollen Systeme bewertet werden, die gewisse Anwendungsfälle (vgl. Kapitel 2.1.3) und Systemgrenzen haben, können *Referenzszenarien* verwendet werden. Referenzszenarien stellen eine begrenzte Anzahl an wissenschaftlich abgeleiteten Szenarien dar, die repräsentativ für alle im Anwendungsgebiet auftretenden Szenarien sind. Für Systeme, die in allen Situationen funktionieren müssen, die im

Verkehr auftreten können, wie es beim vollautomatisierten Fahren der Fall ist, ist die Liste an Referenzszenarien allerdings möglicherweise niemals vollständig. [EBNER ET AL. 2011]

2.1.2 Fahr- und Verkehrssituation

Die Begriffe *Fahrsituation* und *Verkehrssituation* sind in der Literatur mehrfach definiert worden. Es gibt unterschiedliche Betrachtungsweisen, wie eine Situation als solche erkannt und definiert wird. Fest steht, dass eine Situation von unterschiedlichen Fahrern verschieden wahrgenommen werden kann, somit können auch die Verhalten als Reaktion auf die wahrgenommene Situation verschieden sein.

Im Verkehrswesen werden insbesondere die *Verkehrssituation* und die *Fahrsituation* unterschieden. In BENDA ET AL. [1983] wird die Verkehrssituation als „Umgebung des Mensch-Maschine-Systems Fahrer-Fahrzeug aus Fahrersicht“ definiert. Es wird also die Situation, die individuell von einem Fahrer wahrgenommen wird, betrachtet. FASTENMEIER [1995] unterscheidet nach objektiver und subjektiver Verkehrssituation und stellt fest, dass eine objektive Beschreibung von Verkehrssituationen nicht ausreichend ist, da jeder Fahrer diese individuell wahrnimmt.

REICHART [2001] unterscheidet drei Begriffe; die *Verkehrssituation* sowie die *Fahr-* und *Fahrersituation*. Hierbei definiert er die *Verkehrssituation* als „objektiv gegebene räumliche und zeitliche Konstellation der verkehrsbezogenen Einflussgrößen“. Im Gegensatz zu dieser objektiven Sichtweise beschreibt die *Fahrsituation* den Teil der Verkehrssituation, die von einem Fahrer wahrgenommen werden kann. Die *Fahrersituation* definiert die subjektiv, von jedem Fahrer individuell, tatsächlich wahrgenommene Situation.

PELLKOFER [2003] definiert in seiner Arbeit die Situation als „die Summe der für die Verhaltensentscheidungen relevanten Sachverhalte“, hierbei wird also direkt eine Einschränkung auf die Relevanz von Sachverhalten vorgenommen. „Relevant für die Verhaltensentscheidung sind die aktuelle Szene, die Intentionen und Aktionen aller Subjekte in der Szene (einschließlich des Eigenfahrzeugs) und die Fähigkeiten des Eigenfahrzeugs, welche die Entscheidungsalternativen darstellen“ [PELLKOFER 2003].

Auch nach ULBRICH ET AL. [2015] ist die Situation subjektiv aus der Perspektive eines Akteurs. Sie basiert auf einer Szene nach der zuvor genannten Definition und wird durch die Auswahl von relevanten Informationen erweitert bzw. eingeschränkt. Damit gehören immer auch die Ziele des Akteurs zur Beschreibung einer Situation.

Die Analyse von Fahrsituationen spielt auch in der Verkehrssicherheitsforschung und Verkehrspsychologie eine bedeutende Rolle. Untersuchungen konzentrieren sich hierbei vor allem auf die Anforderungen, die in den Situationen an den Fahrer gestellt werden. Ist eine Fahrsituation sehr komplex, können Fahrer überfordert sein. Diese Situationen sind daher anfälliger für Unfälle. Sind die Fahrsituationen allerdings über einen langen Zeitraum zu einfach,

ist der Fahrer unterfordert. Auch Monotonie kann zu vermehrten Unfällen führen. [FASTENMEIER 1995]

Der Begriff der *Verkehrssituation* kann als makroskopisch betrachtet werden. Er beinhaltet meist Informationen zum Verkehrszustand (Stau, freier Verkehr, etc.) oder Sicht- und Witterungsbedingungen (Dämmerung, Tageslicht, etc. mit bzw. ohne witterungsbedingter Sichtbehinderung), die die Situation beschreiben [REICHART 2001]. Dieser Begriff ist also im Gegensatz zum Begriff der Fahr- und Fahrersituation nicht subjektiv.

Zusammenfassend sind in untenstehender Grafik die zuvor definierten Begriffe beispielhaft dargestellt und abgegrenzt.

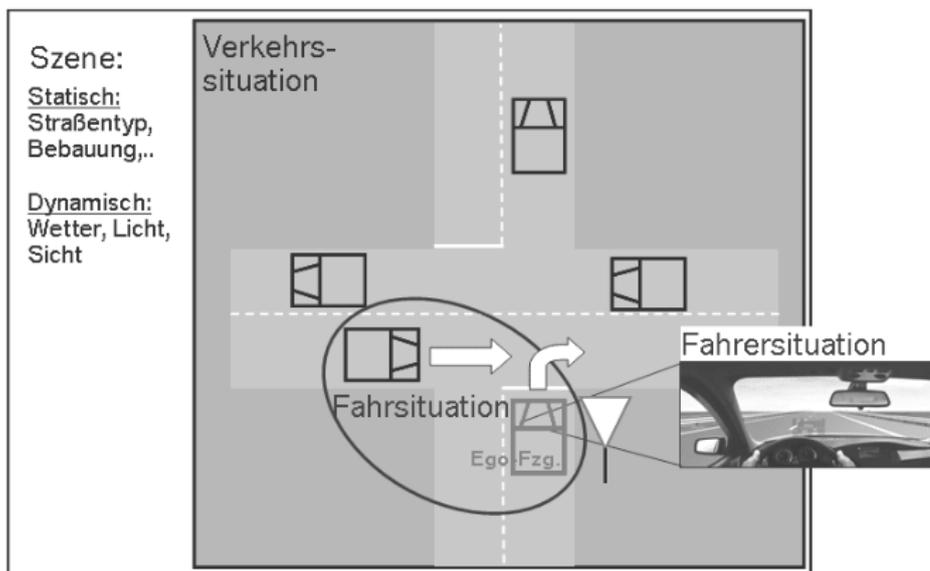


Abbildung 2.1: Unterscheidung der Begriffe der Situationsbeschreibung aus [DOMSCH UND NEGELE 2008]

Zur Beschreibung einer Situation gehört also auch die Betrachtung der Relevanz der Situationsmerkmale. Für den Fahrer in der Situation ist dann von Bedeutung, diese Merkmale wahrzunehmen, korrekt zu interpretieren und in seinen Handlungen zu berücksichtigen. Dieser Vorgang, bei dem sich der Fahrer ein mentales Modell der Situation aufbaut, wird als *Situationsbewusstsein* (engl. *Situation Awareness*) bezeichnet. Die drei Stufen, die zum Situationsbewusstsein gehören, sind die Wahrnehmung der Elemente der Situation, das Verständnis der Situation und die Antizipation, in der die Entwicklung der Situation in die Zukunft vorhergesagt wird. Aufbauend auf diesem Situationsbewusstsein plant der Fahrer seine Handlungen. Wichtig ist, dass die Repräsentation der Situation möglichst gut der Realität entspricht. Gibt es dabei Fehler, beispielsweise, weil manche Merkmale nicht wahrgenommen oder nicht korrekt interpretiert wurden, kann dies zu gefährlichen Situationen im Verkehr führen. [VOLLRATH ET AL. 2011] Übernimmt ein automatisiertes System die Aufgabe des Fahrzeugführers, wird die Umgebung über Sensoren wahrgenommen. Diese Informationen müssen verarbeitet werden und werden dann im sog. Umfeldmodell repräsentiert (vgl. Kapitel 2.3.2). Um die Sicherheit

eines solchen Systems zu garantieren, muss darauf geachtet werden, dass darin alle relevanten Merkmale vorhanden sind. Weiterhin müssen diese durch die Algorithmen korrekt interpretiert werden um richtige Fahrverhalten abzuleiten.

Für die Definition von relevanten Situationen für automatisierte Fahrsysteme, bedarf es einer einheitlichen Situationsbeschreibung. Daher ist es von Bedeutung, die Komponenten, welche zur Situationsbeschreibung gehören sollen, zu definieren. Je nach Fragestellung der Untersuchung, können diese unterschiedlich sein. Im Folgenden werden einige Ansätze vorgestellt, in denen einheitliche Situationsbeschreibungen entwickelt wurden und Klassifikationen durchgeführt wurden.

Komponenten der Situationsbeschreibung und Klassifikation von Situationen

Zu den Komponenten der Situationsbeschreibung gehören immer die statischen Komponenten des Umfeldes, das dynamische Umfeld und das betrachtete Fahrzeug (*Ego-Fahrzeug*) innerhalb dieses Umfeldes. Die Schwierigkeit besteht darin, genügend zu abstrahieren, um die Anzahl der möglichen Klassen einzuschränken und doch ausreichend präzise und unterscheidbar zu bleiben.

In der Beschreibung der Situation spielt die Relevanz einzelner Merkmale für das Ego-Fahrzeug eine bedeutende Rolle. In ULBRICH ET AL. [2015] wird am Beispiel des Überfahrens eines Knotenpunkts wie folgt unterschieden: Wenn die Mission des Ego-Fahrzeugs das Geradeausfahren am Knotenpunkt ist und sich ein Fahrradfahrer neben dem Ego-Fahrzeug befindet, der ebenfalls den Knotenpunkt überquert, jedoch physisch keine Möglichkeit hat, den Radweg zu verlassen und somit in Interaktion mit dem Ego-Fahrzeug zu kommen, so ist der Fahrradfahrer nicht Teil der Situationsbeschreibung, da er für die Mission des Ego-Fahrzeugs nicht relevant ist. Sollte die Mission des Ego-Fahrzeugs jedoch das Rechtsabbiegen sein und es kann zu Interaktion mit dem Radfahrer kommen, so ist dieser Teil der Situationsbeschreibung. Sollen automatisierte Fahrsysteme entwickelt werden, die in einer bestimmten Umgebung, beispielsweise am Knotenpunkt, funktionieren sollen, ist also von Interesse, welche Situationen in dieser Umgebung auftreten können.

BENDA ET AL. [1983] führten Studien durch, um wichtige Aspekte zur Differenzierung zwischen Situationen zu identifizieren. FASTENMEIER [1994] hat diese Beschreibung modifiziert indem die Anzahl der beschreibenden Attribute reduziert wurde um Fahrsituationen aufzuzeigen, die eine repräsentative Fahrt beschreiben. Zusätzlich wurde eine Studie durchgeführt, die bestimmte, wie stark die Fahrer in den Situationen beansprucht werden und so eruiert, wie groß die Beanspruchung und die Anforderungen an den Fahrer während eines typischen Weges (z.B. zur Arbeit oder Freizeitaktivität) ist.

BENDA ET AL. (1983) nutzen Variablen der im Folgenden genannten Merkmale zur Klassifikation von Verkehrssituationen. Die Merkmale sind also Kategorien, die jeweils unterschiedliche Ausprägungen haben können.

- Straßenart
- Ausbauzustand, Straßenbreite
- Wegverlauf in horizontaler (Kurvigkeit) und vertikaler Ebene (Steigung/ Gefälle)
- Knotenpunktbereiche und Vorfahrtsregelung
- Vorfahrtsregelung und Verkehrsschilder
- Verkehrsdichte
- Allgemeine Sichtverhältnisse
- besondere Sichtbehinderungen
- Reibbeiwerte, Straßenzustand und -belag
- Wetterbedingungen
- Engstellen, Hindernisse
- besondere Gefahren

Zu jedem Merkmal werden mögliche Variablen bestimmt. Das Merkmal Straßentyp, beispielsweise, kann entweder eine Autobahn, eine Landstraße oder eine Innerortsstraße sein. Zusätzlich werden für die verschiedenen Variablen mögliche Kategorien definiert. Berechnet man nun die Anzahl der möglichen Kombinationen der Kategorien aus den verschiedenen Merkmalen, so ergibt sich eine Anzahl von fast 30 Millionen verschiedenen Situationen. Bereits aus diesen Überlegungen wird klar, dass der Aufwand, Systeme auf alle möglichen Situationen hin zu testen, enorm groß werden kann. FASTENMEIER [1994] entwickelte eine Topologie von Straßenverkehrssituationen die jene von BENDA ET AL. [1983] vereinfacht. Abbildung 2.2 gibt die Kategorien und deren mögliche Ausprägungen wieder.

Kategorie		Ausprägung		Kategorie		Ausprägung	
Straßentyp, Straßenausbau	Landstraße	L1	Landstraße, erbaut nach modernen Längs- und Querschnittsrichtlinien, mindestens 2 Fahrspuren, Fahrbahnmarkierungen (befestigte Bankette), weitkurviger Verlauf	Trasse	Horizontalverlauf	H0	ohne Kurve, Gerade
			H1			Kurve	
		L2	Landstraße, nach älteren Richtlinien erbaut oder Landstraße zweiter Ordnung, Nebenstrecken: schmale, runde Fahrbahn, Fahrbahnmarkierung teilweise oder ganz fehlend, engkurviger Verlauf		Vertikalverlauf	V0	ebener Verlauf
			V1			Steigung, Gefälle	
	City, innerorts	C1	alle Straßen mit 2 (oder mehr) Fahrbahnen, Fahrbahnen durch Grünstreifen o.ä. getrennt (außer BAB): innerstädtischer Ring u.ä. Straßen		Knotenpunkte	K0	ohne Kreuzung
						K1	ampelgeregelte Kreuzung
		K2	Kreuzung, Regelung rechts-vor-links				
		K3	Kreuzung, Regelung durch Beschilderung, Fahrer vorfahrtberechtigt (auch Ein- und Ausfahrten auf BAB aus Sicht des Fahrers, der sich auf der BAB befindet)				
		C2	eine Fahrbahn, breit, mindestens in 4 Fahrspuren befahrbar	K4	wie K3, aus der Sicht des Wartepflichtigen		
		C3	wie C2, mit eingelassenen Schienen	Engstellen	E0	ohne Engstellen und Hindernis	
		C4	eine Fahrbahn, 2-3-spurig befahrbar		E1	Engstellen, Hindernisse, Fahrbahnverengung, schmale Brücke, etc.	
	C5	wie C4, mit eingelassenen Schienen	Fahrtrichtung		F0	ohne Fahrtrichtungsänderung	
	C6	schmale oder durch Beparken verengte Fahrbahn, enge Ortsdurchfahrten		F1	Rechtsabbiegen		
	C7	alle Einbahnstraßen	F2	Linksabbiegen			

Abbildung 2.2: Klassifikation für Verkehrssituationen ohne Autobahnfahrten aus [FASTENMEIER 1995]

Auf Basis dieser Arbeiten wurde eine situative Anforderungsanalyse von Fahraufgaben in FASTENMEIER UND GSTALTER [2007] vorgestellt. Der Ansatz wurde auch dafür verwendet, Fahrerassistenzsysteme zu analysieren.

2.1.3 Anwendungsfall (Use Case)

Werden technische Systeme thematisiert, findet häufig der Term Anwendungsfall (häufiger verwendet der Englische Term use case) Verwendung. Der Begriff kommt aus dem Systems Engineering, wo Anforderungen eines Systems beschrieben werden [OBJECT MANAGEMENT GROUP 2011]. Als Schlüsselemente werden das Subjekt, also das betrachtete System, Akteure, also andere Einheiten außerhalb des Systems sowie Anwendungsfälle (use cases), die das erwünschte Verhalten des Systems spezifizieren, genannt [OBJECT MANAGEMENT GROUP 2011].

Use cases werden zumeist zielorientiert aus Nutzersicht formuliert. Use cases für ein Telefon wären beispielsweise *jemanden anrufen* oder *eine Telefonnummer speichern*. In ihrem Beitrag stellen OMASREITER UND METZKER [2004] heraus, dass dieser Ansatz für Fahrerassistenzsysteme nicht zielführend ist, da von solch einem System, wie beispielweise der adaptiven Geschwindigkeitsregelung, in sehr vielen Fällen die gleiche Aufgabe ausgeführt werden muss (beispielsweise einen gewissen Abstand zum Vorderfahrzeug halten), dies jedoch unterschiedlich komplex je nach Umgebung, in der sich das System befindet, sein kann. Der fundamentale Unterschied zu Systemen wie dem zuvor genannten Telefon ist, dass diese relativ unabhängig vom Kontext, in dem sie sich befinden, sind. Bei Fahrerassistenzsystemen muss zwar nur ein Ziel des Nutzers erfüllt werden (Abstand zum Vorderfahrzeug halten), dies muss jedoch in allen Situationen funktionieren. Wichtiger ist es daher, diese verschiedenen Situationen zu definieren. Es wird daher eine Kontext-orientierte Formulierung von use cases für Fahrerassistenzsysteme vorgeschlagen, die auch beim automatisierten Fahren verwendet wird. [OMASREITER UND METZKER 2004]

Bei Fahrerassistenzsystemen und automatisiertem Fahren bestimmt der use case die Sollfunktion und die Funktionsgrenzen [SIPPL ET AL. 2016]. Use cases können mit unterschiedlicher Granularität beschrieben werden. Für das automatisierte Fahren kann dies sehr grob sein, wie beispielsweise Fahren auf der Autobahn als ein Anwendungsfall im Vergleich zum Fahren im urbanen Verkehr als ein weiterer. Die Beschreibung kann auch sehr spezifisch sein, indem jede Situation einzeln definiert wird. Aktuell gibt es etliche Forschungsaktivitäten, die sich mit der Definition von Anwendungsfällen für das automatisierte Fahren beschäftigen. In der Arbeit von WACHENFELD ET AL. [2015], beispielsweise, beinhalten use cases für automatisiertes Fahren neben der Beschreibung der Szenerie (z.B. Autobahn oder urbane Straße) das Vorhandensein und den Typ anderer dynamischer Objekte sowie Spezifikationen des Ego-Fahrzeugs (z.B. Maximalgewicht und Geschwindigkeit) und Interventionsmöglichkeiten für den Fahrer. Aktuelle Forschungen streben danach, die Beschreibungsformen für use cases des automatisierten Fahrens zu vereinheitlichen [WACHENFELD ET AL. 2016], [GEYER ET AL. 2014].

2.2 Fahrverhalten und Verkehrsgeschehen

Die Modellierung des Fahrerverhaltens von Kraftfahrern hat eine große Bedeutung in der Verkehrswissenschaft. Das Wissen über das Verhalten von Fahrern in den unterschiedlichen Fahr- und Verkehrssituationen ist für die Planung von Infrastruktur von Bedeutung. Auch in der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen ist dieses Wissen, beispielsweise für die Prädiktion von Fahrerverhalten anderer Verkehrsteilnehmer, relevant. Im Folgenden werden einige Modelle für die Darstellung des Fahrerverhaltens vorgestellt.

Das 3-Ebenen Modell von DONGES [1982] beschreibt die Ebenen, auf denen ein Fahrer während der Fahrt handeln muss. Die *Navigationsebene (strategic level)* bezieht sich dabei auf Aufgaben, die bewusst und nur selten durchgeführt werden müssen. Die Routenwahl ist eine klassische Aufgabe dieser Kategorie. Die *Bahnführungsebene (manoeuvring level)* betrifft Entscheidungen wie das Fahrstreifenwechseln oder das bewusste Anpassen der Geschwindigkeit. Die *Stabilisierungsebene (control level)* beinhaltet im Gegensatz dazu Aufgaben, die eher unterbewusst von Fahrern durchgeführt werden. Hierzu werden kleinere Korrekturen des Lenkwinkels und Anpassungen der Geschwindigkeit gezählt.

RASMUSSEN [1983] unterscheidet bei der Beschreibung der Fahreraufgaben ebenfalls drei Ebenen, die er mit *wissensbasiert*, *regelbasiert* und *fähigkeitsbasiert* beschreibt. Wissensbasierte Tätigkeiten beruhen demnach auf Wissen und Erfahrungen der Fahrer, während regelbasiertes Verhalten solches ist, bei dem der Fahrer auf Regeln zurückgreift, die er aus anderen Situationen kennt. Das Verhalten für die aktuelle Situation wird daraus abgeleitet. Das fähigkeitsbasierte Verhalten entspricht den kurzfristigen Handlungen, die im Modell von Donges den Aufgaben auf der Stabilisierungsebene entsprechen. Der Fahrer muss nicht über die Regeln dieser Handlung nachdenken, sondern reagiert intuitiv auf einen Stimulus. Die Aufgaben auf den verschiedenen Ebenen können personenabhängig variieren. So sind einige Aufgaben für fahrfähre eher intuitiv und gehören somit zu Stabilisierungsebene, während Fahranfänger für dieselben Aufgaben auf gelernte Regeln zurückgreifen, da die Handlungen noch nicht in Intuition übergegangen sind.

Die beiden Modelle von DONGES [1982] und RASMUSSEN [1983] sind in Abbildung 2.3 gemeinsam dargestellt. Erkennbar ist darin auch, dass die Ebenen direkt miteinander verknüpft sind und eine Verbindung nach Außen vorhanden ist. Informationen, die aus der Umwelt kommen, nimmt der Fahrer sensorisch wahr, über seine Aktionen interagiert der Fahrer mit der Umwelt. Je nach Art der Information, müssen auch Entscheidungen in der Ebene des wissensbasierten Handelns getroffen werden oder Regeln abgerufen werden. Bei anderen wiederum sorgt der Stimulus direkt für eine Reaktion. Weiterhin wird aus der Grafik deutlich, dass Entscheidungen, die auf einer höheren Ebene getroffen wurden, auf darunterliegenden Ebenen betrachtet bzw. ausgeführt werden. Durch die Pfeile wird in der Grafik auch angedeutet, dass die Ebenen der beiden Modelle nicht jeweils Eins zu Eins zugeordnet werden, sondern beispielsweise Aufgaben auf der Führungsebene sowohl wissensbasiertes, als auch regelbasiertes und fertigkeitbasiertes Verhalten fordern können.

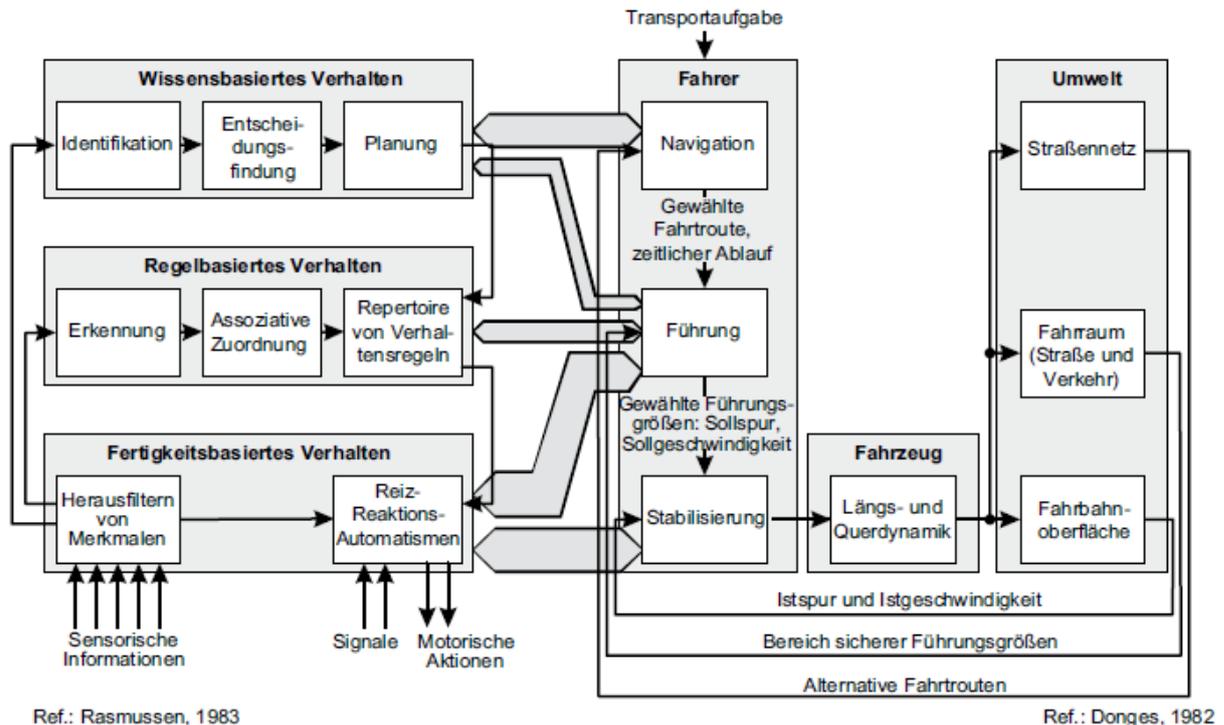


Abbildung 2.3: Verknüpfung der 3-Ebenen Modelle von DONGES [1982] und RASMUSSEN [1983] zur Beschreibung der Aufgaben von Kraftfahrzeugfahrern aus [DONGES 2015]

Fahrer agieren als Regler in einem System Fahrer-Fahrzeug-Umwelt. Den Menschen als regelndes Element nachzubilden ist für Verkehrswissenschaftler besonders interessant. In mikroskopischen Verkehrssimulationen werden Fahrverhalten einzelner Fahrer-Fahrzeug Einheiten modelliert, somit könnten beispielsweise neue Verkehrssteuerungen oder Wirkungen von Fahrverhalten auf bestimmte Verkehrskenngrößen getestet werden.

Bei der Modellierung von Fahrerverhalten in der mikroskopischen Verkehrssimulation werden insbesondere die Ebenen der Bahnführung und Navigation betrachtet. Die Fahrerverhaltensmodelle unterscheiden sich auf der Bahnführungsebene in Modelle der Längsführung (Fahrzeugfolgemodelle) und der Querführung (Fahrstreifenwechselmodelle). Das Fahrverhalten auf Stabilisierungsebene wird in diesen Modellen eher abstrakt dargestellt, indem Grenzen der Fahrdynamik für ein realistisches Fahrverhalten definiert werden und Verteilungen festgelegt werden, aus denen für die einzelnen Fahrer Wunschgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und weitere Parameter gewählt werden. Das imperfekte menschliche Fahrverhalten wird zum Beispiel durch stochastisches Schwanken in der Geschwindigkeit oder im Abstandsverhalten modelliert. Auf Einzelheiten in der Stabilisierungsebene konzentrieren sich Fahrdynamiksimulationen, die ein Fahrzeug mit allen Komponenten detailliert abbilden und auch externe Störgrößen, wie Wind oder Fahrbahnbeschaffenheit, oder Sensoren abbilden können.

Analog müssen Regler für automatisierte Fahrzeuge, die Teile oder die komplette Fahraufgabe des Fahrers übernehmen, entwickelt werden. Hierzu folgen weitere Erläuterungen in Kapitel 2.3. Die folgenden Abschnitte stellen einige Besonderheiten des Fahrens dar, welche auch in

der Entwicklung des automatisierten Fahrens interessant sind, da sie besondere Herausforderungen darstellen, wenn das Fahrerverhalten nachgebildet oder darauf reagiert werden soll. Das ist zum einen, dass Fahrer besondere Signale aus der Umgebung wahrnehmen und interpretieren, insbesondere wird mit anderen Verkehrsteilnehmern auf verschiedene Arten kommuniziert (vgl. Kapitel 2.2.1). Des Weiteren gibt es gesetzliche Grundlagen auf Basis derer das Fahrverhalten angepasst werden muss (vgl. Kapitel 2.2.2). Häufig kommt es auch zu Fehlern beim Fahren, was zu Verkehrsunfällen führen kann (vgl. Kapitel 2.2.3). Viele Situationen führen zwar nicht direkt zu Unfällen, bergen aber ein gewisses Risiko in sich und bedürfen daher besonderer Aufmerksamkeit (vgl. Kapitel 2.2.4).

2.2.1 Kommunikation zwischen Fahrern

In einigen Fahrsituationen ist es notwendig, mit Fahrern der umgebenden Fahrzeuge oder anderen Verkehrsteilnehmern zu kommunizieren, dies ist teilweise sogar in der Straßenverkehrsordnung verankert. In Fahrzeugen sind hierfür Blinker, Lichter sowie die Hupe vorhanden. Für das verwenden dieser Signale gibt es in den Verkehrsregeln gewisse Vorschriften. Außerhalb dessen werden jedoch auch andere Arten der Kommunikation im Straßenverkehr verwendet. Merten (1977, zitiert in FÄRBER 2015) unterscheidet zwischen unterschiedlichen Arten der Kommunikation zwischen Fahrern, es werden die Arten *Schematismenbildung*, das *vorwegnehmende Handeln*, sowie die *nonverbale Kommunikation* genannt, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

Als *Schematismenbildung* wird bezeichnet, wenn Fahrer Schemata benutzt um von Eigenschaften anderer Verkehrsteilnehmer auf deren Verhalten zu schlussfolgern. Beispielsweise wird aus dem Typ des Fahrzeugs, eines anderen Verkehrsteilnehmers das Verhalten des Fahrers abgeleitet. So wird beispielsweise einem Fahrer eines Sportwagens eine hohe Geschwindigkeit oder stärkere Beschleunigungen zugeschrieben als Fahrern von Kleinwagen. [FÄRBER 2015]

Durch vorwegnehmendes Handeln können andere Verkehrsteilnehmer eine zukünftige Aktion eines Fahrers durch aktuelle kleine Handlungsschritte antizipieren. Dies nutzen Fahrer beispielsweise bei Fahrstreifenwechseln, indem sie sich langsam dem Zielfahrstreifen nähern. Die Fahrer der Fahrzeuge in der Umgebung können daraus vorhersagen, dass der Fahrer bald einen Fahrstreifenwechsel vornehmen wird, selbst wenn der Blinker nicht betätigt wird. [FÄRBER 2015]

Der größte Teil der Kommunikation im Verkehr geschieht nonverbal. Die nonverbale Kommunikation beschreibt alle Kommunikationswege, die ohne Worte geschehen, dazu gehören zum Beispiel der Gesichtsausdruck und der Augenkontakt, Gesten und Körperbewegungen, sowie die Stimme und die Art des Ausdrucks. Im Straßenverkehr wird mittels Gesichtsausdruck und Augenkontakt vor allem kommuniziert, ob ein Verkehrsteilnehmer einen anderen wahrgenommen hat. Durch Körperbewegungen können Verkehrsteilnehmer das Verhalten anderer inter-

pretieren und präzisieren. Wendet sich beispielsweise ein Fußgänger in eine bestimmte Richtung, kann davon ausgegangen werden, dass er in diese Richtung laufen wird. Außerdem werden im Straßenverkehr einige allgemein verständliche Gesten verwendet um unter Verkehrsteilnehmern zu kommunizieren. Dazu werden häufig die Hände verwendet. Auch die Polizei nutzt Sonderzeichen in Form von Gesten und Körperbewegungen, diese müssen von allen Verkehrsteilnehmern unbedingt erkannt und korrekt interpretiert werden, denn sie ersetzen andere weisende Verkehrszeichen. [FÄRBER 2015]

Insbesondere in außergewöhnlichen Verkehrssituationen müssen Fahrer also untereinander kommunizieren. Hierzu ist es notwendig, dass Fahrer Gesten, Zeichen oder andere Arten der Kommunikation von anderen wahrnehmen, korrekt interpretieren und entsprechende Handlungen ableiten. Auch jeder Fahrer selbst muss in der Lage sein mit anderen zu kommunizieren um Verhaltensabsichten kund zu tun. FÄRBER [2015] schlussfolgert, dass auch automatisierte Fahrzeuge dazu in der Lage sein müssen, Kommunikation von anderen Verkehrsteilnehmern zu erkennen und zu interpretieren. Solange sie dies nicht können, müssen sie konservativer fahren, als Menschen dies tun würden. Dies stellt eine Anforderung an das Umfeldmodell des automatisierten Fahrzeugs dar. Um eine korrekte Handlung planen zu können, müssen die Informationen, die aus dem Umfeldmodell kommen auch Intentionen anderer Verkehrsteilnehmer beinhalten, welche aus deren Kommunikation geschlossen wird.

2.2.2 Verkehrsregeln und normatives Fahrverhalten

Grundlage für das Verhalten von Fahrern im Straßenverkehr ist in Deutschland die Straßenverkehrsordnung (StVO). Sie regelt das Verhalten aller Verkehrsteilnehmer auf öffentlichen Straßen, Wegen und Plätzen. Wer ein motorisiertes Fahrzeug im Straßenverkehr führen will, muss zunächst nachweisen, dass er dafür geeignet ist und die nötigen Fähigkeiten besitzt. Dieser Nachweis wird durch eine Prüfung, der eine Fahrschul Ausbildung vorausgeht, erbracht. [VOLLRATH ET AL. 2011] Die Prüfung besteht aus einem theoretischen und einem praktischen Teil, die korrekte Anwendung der Straßenverkehrsordnung spielt darin eine bedeutende Rolle.

Da die Regeln der Straßenverkehrsordnung für menschliche Fahrer geschrieben sind, werden die Verhaltensanweisung meist nicht durch spezifische, quantitative Formulierungen, wie mathematische Formeln oder diskrete Werte, ausgedrückt, sondern bedürfen Interpretation. Dadurch bleibt die Straßenverkehrsordnung generisch und muss nicht jede Situation einzeln definieren. Es werden jedoch häufig Merkmale von Situationen hervorgehoben, die eine Anpassung des üblichen Verhaltens erfordern. Im Folgenden sind einige solcher Beispiele genannt.

Das Fahrverhalten im dichten Verkehr ist oftmals anders als im frei fließenden Verkehr, hierzu regelt §11 Abs. 1 für Knotenpunkte: „Stockt der Verkehr, darf trotz Vorfahrt oder grünem Lichtzeichen nicht in die Kreuzung oder Einmündung eingefahren werden, wenn auf ihr gewartet werden müsste.“ Ebenso gilt dies für Fußgängerüberwege, in der StVO wird dieser Fall durch §26 Abs. 2 geregelt, der besagt: „Stockt der Verkehr, dürfen Fahrzeuge nicht auf den Überweg

fahren, wenn sie auf ihm warten müssten“. Auch in §11 der StVO zu besonderen Verkehrslagen wird in Absatz 3 geregelt: „Auch wer sonst nach den Verkehrsregeln weiterfahren darf oder anderweitig Vorrang hat, muss darauf verzichten, wenn die Verkehrslage es erfordert; auf einen Verzicht darf man nur vertrauen, wenn man sich mit dem oder der Verzichtenden verständigt hat.“ Dabei wird sogar explizit die Kommunikation gefordert. Die Erkennung der Verkehrslage ist also eine weitere Anforderung an das Umfeldmodell, um regelkonforme Entscheidungen treffen zu können.

Für den Fall unübersichtlicher Knotenpunkte greift §8 Abs. 2 StVO, der besagt: „Wer die Vorfahrt zu beachten hat, muss rechtzeitig durch sein Fahrverhalten, insbesondere durch mäßige Geschwindigkeit, erkennen lassen, dass gewartet wird. Es darf nur weitergefahren werden, wenn übersehen werden kann, dass wer die Vorfahrt hat, weder gefährdet noch wesentlich behindert wird. Kann das nicht übersehen werden, weil die Straßenstelle unübersichtlich ist, so darf sich vorsichtig in die Kreuzung oder Einmündung hineingetastet werden, bis die Übersicht gegeben ist. Wer die Vorfahrt hat, darf auch beim Abbiegen in die andere Straße nicht wesentlich durch den Wartepflichtigen behindert werden.“ Auch in diesem Fall wird geregelt, dass Kommunikation, in diesem Fall durch vorwegnehmendes Handeln, verwendet werden soll, denn die Fahrer sollen „durch mäßige Geschwindigkeit, erkennen lassen, dass gewartet wird“. Was konkret Begriffe wie „mäßige Geschwindigkeit“ oder „vorsichtiges Hineintasten“ jedoch bedeuten, wird nicht definiert, sondern muss von Verkehrsteilnehmer in der Situation abgewogen werden.

Im Straßenverkehr gibt es einige Verkehrsteilnehmer bzw. Fahrzeuge, denen besondere Rechte eingeräumt werden müssen. Nach §20 StVO muss es Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs und Schulbussen ermöglicht werden von Haltestellen abzufahren. Auch gelten für das Vorbeifahren besondere Verhaltensregeln. Es ist also von großer Relevanz, diese Fahrzeuge, insbesondere etwaige Zeichen wie das Warnblinklicht, richtig zu erkennen und das Verhalten entsprechend anzupassen.

Des Weiteren müssen Einsatzfahrzeuge mit eingeschaltetem Blaulicht von jedem Verkehrsteilnehmer stets erkannt und als solche identifiziert werden. Ihnen muss nach §38 StVO von allen Verkehrsteilnehmern „sofort freie Bahn“ geschaffen werden. Dabei gilt es vor allem akustische und visuelle Zeichen zu erkennen, das Fahrzeug selbst unterscheidet sich ansonsten evtl. von anderen Verkehrsteilnehmern nicht. Beim Ausweichen für ein Einsatzfahrzeug müssen teilweise andere Verkehrsregeln übertreten werden. Übertragen auf automatisierte Fahrzeuge stellt auch dies große Anforderungen an die Sensorik und das Umfeldmodell, da hierbei nicht nur die Erkennung des Objektes, sondern auch dessen korrekte Klassifikation entscheidend ist. Zusätzlich müssen die Sensoren auch in der Lage sein, akustische Signale wahrzunehmen.

REICHART [2001] entwickelt in seiner Arbeit ein normatives Verhaltensmodell um zu identifizieren, wie Fahrer von Kraftfahrzeugen in den unterschiedlichen Fahrsituationen handeln müs-

sen. Dieses Sollverhalten kann dann mit dem tatsächlichen Fahrverhalten der Fahrer verglichen und Fahrfehler identifiziert werden. Um das normative Verhalten zu bestimmen, werden nicht nur die gesetzlichen Vorschriften, sondern auch das sozial akzeptierte Verhalten im Straßenverkehr, Merkmale der Straßenraumgestaltung, inhärente technisch-physikalische Eigenschaften der Kraftfahrzeuge sowie verallgemeinerbare Eigenschaften der menschlichen Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung betrachtet. Werden Sollwerte für die Führungsgrößen Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigung/Verzögerung, Abstand zu Objekten, Kurs oder Spurlage bestimmt, unterliegen diese stets Einflüssen wie der Trassierung, des Verkehrsflusses, der Verkehrsregeln oder der Sichtverhältnisse. [REICHART 2001]

Einige Forschungsarbeiten zum menschlichen Fahrverhalten stellen heraus, dass Menschen in vielen Situationen ein Fahrverhalten wählen, das nicht den Regeln entspricht. In ihrem Beitrag zeigen ASSADI UND EMMERICH [2013], dass regelwidriges Verhalten, wie beispielsweise das Nichtbeachten von Fahrstreifenbegrenzungen, durchaus effizienzsteigernd wirken kann. Sie zeigen, dass in dichtem Verkehr die Kapazität eines Streckenabschnittes höher ist, wenn sich die Fahrer nicht an Fahrstreifen halten, als wenn der Verkehr komplett durch Fahrstreifen geregelt ist. Das teilweise einhalten von Fahrstreifen führt allerdings zu Kapazitätsminderungen. Sicherheitsaspekte wurden bei den Untersuchungen allerdings nicht betrachtet. Auch WAGNER [2015] beobachtet, dass menschliche Fahrer in vielen Situationen die Regeln übertreten. In seinen Beobachtungen des Abstandsverhaltens stellt er fest, dass die gesetzlichen Empfehlungen nicht eingehalten werden, es dadurch jedoch im Verkehr auf Autobahnen erst später zu Stauereignissen kommt.

Automatisierte Fahrzeuge müssen sich stets an die geltenden Regeln halten. Teilweise könnte es dadurch dazu kommen, dass Verkehrskenngrößen in eine negative Richtung entwickeln [KRAUSE ET AL. 2017]. Die Formulierung der Regeln lässt aber einen gewissen Spielraum in der Umsetzung, da Parameter nicht immer eindeutig quantitativ definiert sind. Außerdem werden teilweise auch Ausnahmen von Regeln explizit benannt, wie in den oben genannten Beispielen erkennbar. Auch der Umgang mit Sonderfällen, wie beispielsweise andere Verkehrsteilnehmer, die sich nicht an die Verkehrsregeln halten, sind Teil des Fragebogenkatalogs, der dazu dient, die Fähigkeiten der Fahrschüler in der theoretischen Führerscheinprüfung zu testen.

Im Zusammenhang mit dem automatisierten Fahren beschäftigen sich zurzeit etliche Forschungsarbeiten mit der Formalisierung von Verkehrsregeln. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass Verkehrsregeln häufig nicht so explizit formuliert sind, dass sie für Maschinen verständlich sind. Häufig bedarf der einer Interpretation oder Adaption je nach Situation. Die Frage der Formalisierung ist aber insbesondere für Haftungsfragen interessant [RIZALDI UND ALTHOFF 2015]. Eine Schwierigkeit stellt dabei auch der grenzüberschreitende Verkehr dar. Zwar gibt es Bestrebungen, die Verkehrsregeln international zu vereinheitlichen, beispielsweise durch das „Übereinkommen über den Straßenverkehr“ von 1968, jedoch gibt es weiterhin international viele verschiedene Verkehrsregeln und Verkehrszeichen.

Festzuhalten ist, dass das Fahrverhalten in Straßenverkehr von vielen Einflussgrößen der Situation abhängt und immer wieder angepasst werden muss. Oberste Priorität haben die gesetzlichen Regeln, jedoch bestimmen auch soziale Normen ein adäquates Fahrverhalten. Menschen entscheiden sich auch des Öfteren bewusst dafür, die Verkehrsregeln nicht einzuhalten, was teilweise sogar positive verkehrliche Wirkungen haben kann. Dies birgt allerdings auch die Gefahr, dass Unfälle geschehen. Das folgende Kapitel widmet sich Fahrfehlern und Betrachtungen zum Verkehrsunfallgeschehen.

2.2.3 Verkehrsunfallgeschehen

Eine wichtige Disziplin innerhalb der Verkehrsforschung ist die Verkehrssicherheit. Im Jahr 2017 starben 3180 Personen im deutschen Straßenverkehr [STATISTISCHES BUNDESAMT 2018]. Die Sicherheit des Straßenverkehrs zu erhöhen, hat daher besondere Priorität. Technische Systeme sind eine der verschiedenen Möglichkeiten, die Fahr- und Verkehrssicherheit zu adressieren. Um zu identifizieren, welche Fahrsituationen besonders häufig zu Unfällen führen, können historische Daten des Unfallgeschehens aus Unfallstatistiken herangezogen werden. In den deutschen Verkehrsunfallstatistiken werden *Unfalltypen* und *Unfallarten* als Grobklassifikation verwendet, um die Unfallsituationen zu beschreiben.

Unfalltypen beschreiben die Fahrsituationen aus denen heraus der Verkehrsunfall entstanden ist. Hierbei werden die folgenden sieben Typen unterschieden: *Fahrerunfälle* (Typ 1) beschreiben Unfälle bei denen der Fahrzeugführer die Kontrolle über sein Fahrzeug verliert. *Abbiegeunfälle* (Typ 2) sind Unfälle, die durch den Konflikt zwischen einem Abbieger und einem "aus gleicher oder entgegengesetzter Richtung kommenden Verkehrsteilnehmer ausgelöst" wird, also Unfälle an Knotenpunkten oder Ausfahrten von Grundstücken. Zum Typ *Einbiegen-Kreuzen-Unfall* (Typ 3) gehören solche, die durch einen einbiegenden oder kreuzenden, also im Gegensatz zum Typ 2 Wartepflichtigen, ausgelöst werden. Bei einem *Überschreiten-Unfall* (Typ 4) besteht der Konflikt, der zum Unfall führte, zwischen einem Fahrzeug und einem die Fahrbahn überschreitenden Fußgänger. Bei einem Unfall durch den *ruhenden Verkehr* (Typ 5) besteht der Konflikt zwischen einem fahrenden und einem haltenden oder parkenden bzw. ein- oder ausparkenden Fahrzeug. Unfälle im *Längsverkehr* (Typ 6) entstehen durch einen Konflikt zwischen Fahrzeugen die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegten. Alle Unfälle, die keinem der vorgenannten Typen zuzuordnen sind, werden zu den *Sonstigen Unfällen* (Typ 7) gezählt. [STATISTISCHES BUNDESAMT 2018]

Mit der *Unfallart* wird die Bewegungsrichtung der Verkehrsteilnehmer zueinander beim ersten Zusammenstoß beschrieben. Hierbei werden zehn verschiedene Arten unterschieden, dies sind die Folgenden [STATISTISCHES BUNDESAMT 2018]:

- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht
- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet
- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt
- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das entgegenkommt

- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt
- Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger
- Aufprall auf ein Hindernis auf der Fahrbahn
- Abkommen von der Fahrbahn nach rechts
- Abkommen von der Fahrbahn nach links
- Unfall anderer Art (alle, die nicht in eine der vorgenannten Kategorien passen)

Als weitere Information, die bei der Unfallaufnahme festgehalten wird, sind die Unfallursachen relevant. Dazu gehören die allgemeinen Ursachen, welche zum Beispiel die Straßen- und Lichtverhältnisse beinhalten können, sowie die personenbezogenen Ursachen, welche das Fehlverhalten der Verkehrsteilnehmer beschreiben. Allen Beteiligten eines Unfalls können Ursachen zugeordnet werden. Die Liste der Unfallursachen umfasst 83 Fehler, die zu einem Verkehrsunfall führen können. Die Zuordnung erfolgt durch den Polizeibeamten an der Unfallstelle und kann dadurch in der Unfallstatistik auch fehlerhaft erfasst sein. [STATISTISCHES BUNDESAMT 2018]

Weitere Merkmale, die in der Unfallaufnahme durch die Polizei spezifiziert werden, sind neben Unfallort und Uhrzeit auch Charakteristika, die beispielsweise beschreiben, wie die Licht- und Sichtverhältnisse zum Zeitpunkt des Unfalls waren, wie die Verkehrsregelung war oder welche anderen Besonderheiten es am Unfallort gab. Des Weiteren werden natürlich auch die Unfallfolgen festgehalten. Dabei wird zwischen Unfällen mit Personenschaden, Unfällen mit Sachschaden und Kleinunfällen, bei denen es weder Personen- noch Sachschäden gab, unterschieden. Weiter wird bei den Unfällen mit Personenschaden unterschieden, ob es Getötete, Schwerverletzte oder Leichtverletzte gab und bei den Unfällen mit Sachschaden, ob dieser ein schwerwiegender Unfall mit Sachschaden war, also ob mindestens eines der beteiligten Fahrzeuge nach dem Unfall nicht mehr fahrbereit war oder nicht. Es wird weiterhin unterteilt, ob einer der Verkehrsteilnehmer unter Einfluss berauschender Mittel stand. Zusätzlich wird im Verkehrsunfallbericht festgehalten, wer am Unfall beteiligt war. Die Verkehrsteilnehmer werden in 39 verschiedene Klassen unterteilt. Abgesehen von diesen Kategorisierungen wird immer auch kein kurzer Bericht des Polizeibeamten erstellt, in dem das Geschehen narrativ beschrieben wird. [STATISTISCHES BUNDESAMT 2018]

Abgesehen von den offiziellen Statistiken zu allen Unfällen, die von der Polizei aufgenommen werden, sammeln andere Stellen weitere Informationen zum Unfallgeschehen. Dies sind beispielsweise Versicherungen, die Daten zu verunfallten Fahrzeugen sammeln und daraus insbesondere Kosten errechnen. Außerdem gibt es in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen einiger Automobilhersteller oder Automobilklubs eigene Abteilungen, die sich mit der Verkehrs- und Fahrzeugsicherheit beschäftigen.

Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) und dessen Unfallforschung der Versicherer (UDV) nutzt die zuvor genannte Unfalltypeneinteilung und präzisiert die Konfliktsituationen weiter in einen dreistelligen Code. Der daraus resultierende Unfalltypenkatalog umfasst 357 Unfalltypen. [GDV UNFALLFORSCHUNG DER VERSICHERER 2016] So

lassen sich noch präzisere Aussagen zum Unfallhergang extrahieren. Das Projekt GIDAS (German In-Depth Accident Study) nutzt diese Einteilung der Unfalltypen und erhebt noch einige weitere Daten im Rahmen der detaillierten Unfalluntersuchung, die für Forschungszwecke durchgeführt wird. Dabei werden spezialisierte Teams zur Unfallaufnahme an den Unfallort geschickt, welche alle Begleitumstände des Unfalls erheben sollen und zwar so präzise, dass der Unfall im Nachhinein in einer Simulation nachgespielt werden kann. Die GIDAS-Datenbank beinhaltet eine geringere Anzahl an Unfällen, da nur Unfälle mit Personenschäden zu bestimmten Zeitpunkten an bestimmten Orten erhoben werden, ist aber tiefer gehender in der Dokumentation der Umstände der Unfälle. [OTTE ET AL. 2003]

Werden Konflikte in Fahrsituationen betrachtet, können die Kategorien aus den zuvor genannten Klassifikationen verwendet werden. Allerdings sind bei der Entwicklung von Systemen, die in allen Fahrsituationen funktionieren sollen, auch solche Situationen interessant, die zwar nicht häufig zu Unfällen führen, aber dennoch kritisch sind. Mehr zur Definition von kritischen Fahrsituationen im Abschnitt 2.2.4.

Das Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) testet neue Fahrzeuge für den europäischen Markt auf das Vorhandensein von sicherheitsrelevanter Technik oder Strukturen zur Unfallvermeidung sowie dem Insassen- und Fußgängerschutz. Ähnliche Programme gibt es auch für andere Märkte, wie der C-NCAP für China und oder US NCAP für die USA. Die Bewertungen sind zwar nicht gesetzlich vorgeschrieben, sondern dienen lediglich der Information für Kunden, jedoch wird in der Fahrzeugentwicklung stets darauf hingearbeitet, die Anforderungen zu erfüllen, um eine gewisse Bewertung zu erhalten. Die Bewertung erfolgt mittels Sternen durch vordefinierte Tests, meist sind dies Crashtests. [HOBBS UND MCDONOUGH 1998]

Bisher wurden in der NCAP Bewertung zumeist *passive Sicherheitssysteme* bewertet, das bedeutet Systeme, die die Unfallbeteiligten (z.B. Fahrzeuginsassen oder Fußgänger) beschützen, wenn es zu einem Unfall kommt. Dazu gehören beispielsweise Gurte und Airbags. *Aktive Sicherheitssysteme* sorgen hingegen dafür, dass ein Unfall gar nicht erst entsteht. Erste Systeme waren beispielsweise das Antiblockiersystem (ABS), welches dafür sorgt, dass beim Bremsen auf nasser Fahrbahn der Bremsweg verkürzt wird, die Räder nicht blockieren und das Fahrzeug der Lenkung folgt [ROBERT BOSCH GMBH 2004]. Neuerdings gehören auch einige Fahrerassistenzsysteme in die Bewertung des NCAP und werden in die Berechnung der Sternewertung mit einbezogen. Automobilhersteller müssen also zunehmend auch solche Systeme in den Fahrzeugen zur Verfügung stellen, um eine entsprechend positive Bewertung zu erreichen. Der Nachweis, dass automatisierte Fahrfunktionen dazu dienen, die Sicherheit zu erhöhen, hat also auch aus Verkäufersicht Relevanz. [VDA 2018b] Im Abschnitt 2.3 wird das automatisierte Fahren, zu dem die Fahrerassistenzsysteme als eine Stufe zählen, detaillierter vorgestellt. Eines der Ziele von automatisierten Fahrfunktionen ist die Verbesserung der Sicherheit.

2.2.4 Kritikalität von Fahrsituationen

Soll ein System das Fahren sicherer machen, wird analysiert, welche Situationen sicher oder unsicher sind. In diesem Zusammenhang wird häufig von dem Begriff der *Kritikalität* Gebrauch gemacht. In der Beurteilung der Kritikalität von Fahrsituationen sind nicht nur Situationen, die zu Unfällen führen interessant, sondern auch solche, die eine *Gefahr* darstellen, auch wenn sie nicht in einem Unfall resultierten. Bei der Bewertung des menschlichen Fahrerhaltens werden Fahrfehler identifiziert. Situationen, die häufig zu Fahrfehlern führen werden als kritischer eingestuft. Insbesondere in solchen Situationen brauchen Fahrer Unterstützung, wobei automatisierte Fahrfunktionen helfen können. [WELLER UND SCHLAG 2002]

Der Begriff *kritisch* kommt aus dem Griechischen und bedeutet „zur entscheidenden Beurteilung gehörend“. Laut Duden wird er einerseits für das Beurteilen oder Prüfen verwendet. Häufig wird der Begriff dabei als Synonym für eine negative Beurteilung gebraucht. Andererseits wird der Begriff *kritisch* verwendet, um von einer entscheidenden Entwicklung zu sprechen. Hierbei ist häufiger eine Entwicklung bezeichnet, die eine Gefährdung bedeutet. Als Beispiel wird im Duden „der Fahrer kam in eine kritische Situation“ genannt. [DUDENREDAKTION o.J.b] Auf das Fahren bezogen, wird also eine Situation bezeichnet, die entscheidend dafür ist, ob ein Unfall entsteht. In einer kritischen Situation besteht also eine Gefährdung, das kann zum Beispiel ein Konflikt mit einem anderen Verkehrsteilnehmer sein.

Der Begriff Gefährdung ist in ISO/IEC Guide 51 als eine potenzielle Schadensquelle definiert. Für die Entwicklung von elektrischen, elektronischen und programmierbaren elektronischen (E/E/PE) Systemen, die eine Sicherheitsfunktion ausführen, gilt die IEC 61508. Sie regelt, dass in der Entwicklung eines technischen Systems betrachtet werden muss, welche *Risiken* durch das System bestehen und daraufhin Anforderungen an die Sicherheit des Systems definiert werden müssen. Bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und automatisiertem Fahren ist es aus diesem Grund nötig, eine funktionale Sicherheit zu garantieren [MTL INSTRUMENTS GROUP PLC. 2002]. Weitere Ausführungen dazu folgen im Abschnitt 2.3.7.

Das *Risiko* stellt eine Beurteilung der Gefährdung dar. Sie wird meist mit mehreren Kategorien bemessen. Ein wichtiger Aspekt dabei ist, wie wahrscheinlich es ist, dass das Ereignis oder die Situation, die die Gefährdung darstellt, eintritt. Auch die möglichen Folgen, die aus einer Gefährdung resultieren, werden in die Risikobewertung aufgenommen. Ein weiterer Aspekt ist der sogenannte Aussetzungsgrad, der kann beispielsweise über die Dauer bestimmt werden, über die die Gefährdung besteht.

Eine Gefährdung in einer Fahrsituation kann durch verschiedene Umstände bestehen. Einerseits kann ein Fahrzeug mit anderen Verkehrsteilnehmern in *Konflikt* stehen. Es können aber auch andere Umstände zu Unfällen im Verkehr führen. In den sog. Alleinunfällen oder Fahr-unfällen (vgl. Kapitel 2.2.3) resultiert ein Unfall nicht aus einem Konflikt sondern hat nur einen Unfallbeteiligten. Das kann einerseits daraus resultieren, dass Menschen beispielsweise durch Ablenkung oder Unaufmerksamkeit Fahrfehler machen, andererseits können aber auch äu-

ßere Umstände, wie Glätte der Fahrbahn zu solchen Unfällen führen. Insbesondere bei Fahrzeugen, die mit einer Reihe an technischen Elementen ausgestattet sind, können auch die elektronischen Systeme selbst eine Gefahr darstellen. Solche Aspekte werden jedoch hier nicht weiter berücksichtigt.

Besteht die Gefahr eines Unfalls mit einem anderen Verkehrsteilnehmer, muss es zunächst einen *Konflikt* zwischen diesen geben. Ein Konflikt besteht dann, wenn sich die Verkehrsteilnehmer auf Kollisionskurs befinden. Ein Konflikt wird von AMUNDSON UND HYDÉN [1977] die als „eine beobachtbare Situation, in der sich zwei oder mehr Verkehrsteilnehmer in Zeit und Raum so nahekomen, dass es ein Risiko einer Kollision gibt, wenn deren Bewegungen unverändert bleiben“ definiert. Auch die in der Unfallstatistik verwendeten Unfalltypen beschreiben Verkehrskonflikte, da sie die Situation beinhalten, die vor den Zusammenstoß bestand.

Wenn ein Unfall noch abgewendet werden kann, wird häufig der Begriff *Beinahe-Unfall* verwendet. In HOFFMANN [2014] werden die zuvor genannten Begriffe zeitlich einsortiert. Wie in Abbildung 2.4 zu erkennen ist, birgt das Normalverhalten kein Risiko für einen Unfall. Jede Abweichung davon, als *Fahrfehler* bezeichnet, erhöht dieses Risiko. Je höher das Risiko für einen Unfall, desto kritischer wird die Situation.

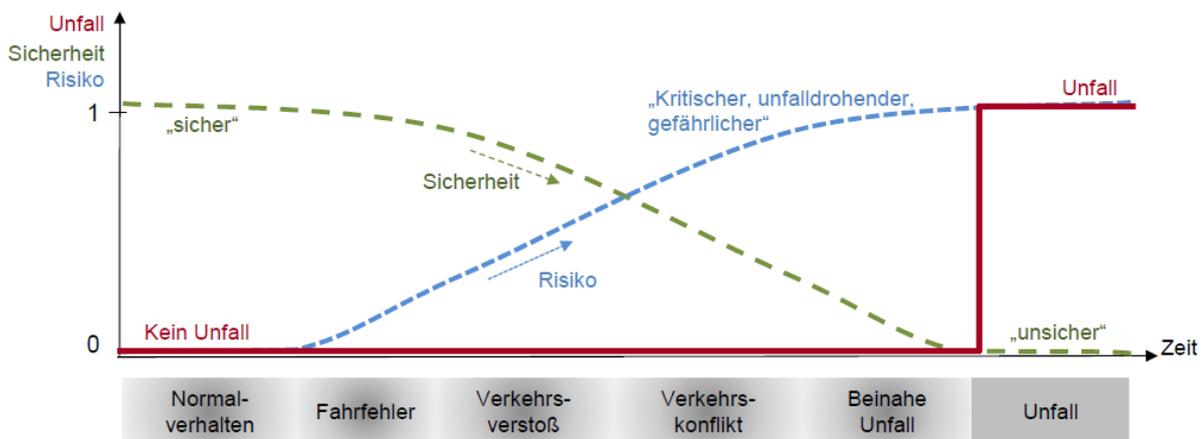


Abbildung 2.4: Zusammenhang zwischen aus Sicherheit und Risiko und Einordnung der Begriffe der Verkehrssicherheit aus [HOFFMANN 2014]

Bei der Beurteilung der Kritikalität einer Fahrsituation sind nicht nur tatsächlich aufgetretene Unfälle interessant, auch die Analyse von Beinahe-Unfällen beinhaltet aufschlussreiche Indizien darüber, in welchen Situationen Fahrer Fehler machen. Ferner treten Konflikte auch viel häufiger auf als Unfälle. Aus diesem Grund wurde die *Verkehrskonflikttechnik* entwickelt. Sie stellt ein standardisiertes Beobachtungsverfahren dar, um Verkehrskonflikte zu erfassen und damit die Gefährdungen abzuschätzen [ERKE UND GSTALTER 1985]. Um Beinahe-Unfälle zu quantifizieren, werden Ersatzkenngrößen für die Bewertung der Sicherheit, sogenannte *Surrogate Safety Assessment Measures (SSAM)* verwendet [GETTMAN ET AL. 2008]. Beispielsweise bemisst die *Time To Collision (TTC)*, wie viel Zeit bis zu einem möglichen Zusammenstoß verbleibt. Aus Beobachtungen sind solche Werte jedoch nur sehr schwer zu erfassen und

auch Simulationsmodelle sind mit Fehlern behaftet. Aus einem mit Sensorik ausgestatteten Fahrzeug heraus können solche Werte gemessen werden. Automatisierte Fahrfunktionen beruhen auf den Informationen aus einer Vielzahl an Sensoren.

Automatisierten Fahrzeugen wird eine positive Wirkung auf die Sicherheit des Verkehrsablaufs zugeschrieben. Eine Vielzahl an Forschungsarbeiten beschäftigte sich in jüngster Vergangenheit und aktuell mit dieser Bewertung. Dabei werden häufig Verkehrsunfalldaten zurate gezogen. VOLLRATH ET AL. [2006] beziehen in ihre Bewertung Unfalltypen des GDV, die Konflikte vor dem Unfall darstellen, in die Bewertung ein und schätzen dadurch den Sicherheitsgewinn ab, der sich durch die Einführung eines entsprechenden Fahrerassistenzsystems ergeben würde.

Für diese Arbeit, in der die Fahrsituationen im urbanen Verkehr analysiert werden sollen, ist ebenfalls die Betrachtung von Konflikten besonders relevant. Automatisierte Fahrzeuge müssen Konflikte in der Manöverplanung einbeziehen. Dafür ist zunächst die Identifikation der möglichen Konfliktpartner aus der Erfassung des Umfeldes nötig. Die Betrachtung der möglichen Konflikte, die aus einer Situation heraus entstehen könnten, ist in der Situationsanalyse bedeutend. Wichtig ist hierbei auch anzumerken, dass automatisierte Fahrzeuge auch grundsätzlich andere Unfälle verursachen könnten als menschliche Fahrer. Durch die Präzision einiger Sensoren und Aktuatoren ist es vorstellbar, dass viele Fahrfehler vermieden werden können. Die Daten von Fahrzeugsensoren sind jedoch auch fehlerbehaftet. Der folgende Abschnitt befasst sich mit den verschiedenen Komponenten des automatisierten Fahrens und geht dabei unter anderem auch auf die Sensoren und die Situationsanalyse ein.

2.3 Automatisiertes Fahren

Moderne Fahrzeuge sind mit einer Vielzahl an Sensoren ausgestattet, die es dem Fahrzeug erlauben, die Umgebung wahrzunehmen (siehe dazu Abschnitt 2.3.1). Basierend auf den fusionierten Informationen unterschiedlichster Sensoren wird ein Abbild der Umgebung erschaffen, dieses sogenannte *Umfeldmodell* dient als Basis für das automatisierte Fahren.

Auf Basis der Informationen zur Umgebung wird dann bestimmt, in welcher Fahrsituation sich das Fahrzeug befindet und welche Fahrstrategie angewandt werden muss. Die darauf aufbauende Ebene des automatisierten Fahrens ist die sogenannte *Bahnführungsebene*, in der eine Trajektorie für das Fahrzeug geplant wird. Es ergeben sich Trajektorien, welche für das Fahrzeug umsetzbar und innerhalb bestimmter Fahrdynamik- und Komfortgrenzen liegen. Unterschiedliche Methoden existieren, aus der Vielzahl an möglichen Trajektorien die optimale auszuwählen. In der *Fahrzeugführungsebene* werden für die ausgewählte Trajektorie konkrete Werte für die Aktuatoren berechnet. Dies kann eine Verzögerung, Beschleunigung oder ein Lenkwinkel sein. Diese werden dann von den entsprechenden Aktuatoren (Antrieb, Bremse, Lenkung) umgesetzt. In den verschiedenen Projekten, in denen automatisierte Fahrzeuge entwickelt werden, werden die Ebenen teilweise unterschiedlich benannt. Innerhalb der DARPA Urban Challenge, ein Wettbewerb, welcher dazu herausforderte einen Parcours der

städtische Szenarien abbildete mit einem Fahrzeug autonom zu absolvieren, haben etliche Uiversitäten und Forschungseinrichtungen autonome Systeme entwickelt und innerhalb des Wettbewerbs auf die Probe gestellt. Das Gewinnerteam mit dem Fahrzeug Boss plante die Fahrzeugführung auf drei Ebenen. Während die *Missionsplanung* die oberste Ebene darstellt, welche über das Ziel entscheidet, trifft die *Verhaltensebene* taktische Entscheidungen, beispielsweise ob ein Fahrstreifenwechsel durchzuführen ist. Die unterste Ebene stellt die *Manöverplanung* dar, welche die konkreten Manöver plant um das Ziel zu erreichen und dabei Hindernissen ausweicht. [URMSON ET AL. 2008] In dieser Wortwahl ist also die Manöverplanung die Planung der Trajektorie.

Abbildung 2.5 zeigt eine mögliche Systemarchitektur mit den Benennungen von AEBERHARD ET AL. [2015]. Darin ist auch die Ähnlichkeit zur Regelung bei menschlichen Fahrern, die in Abbildung 2.3 betrachtet wurde, zu erkennen. Mit *Führung* wurde dort die Bahnführungsebene bezeichnet und *Stabilisierung* entspricht bei einem automatisierten System der Fahrzeugführungsebene. Die *Navigationsebene* ist in Abbildung 2.5 nicht explizit dargestellt, das Navigationsziel muss jedoch ebenfalls eine Eingabe in das System sein. Die sensorischen Informationen aus der Umgebungserfassung kommen in einem technischen System von verschiedenen Sensoren, in einem Umfeldmodell werden diese Information zusammengeführt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Komponenten unter Verwendung der Benennung aus Abbildung 2.5 erläutert.

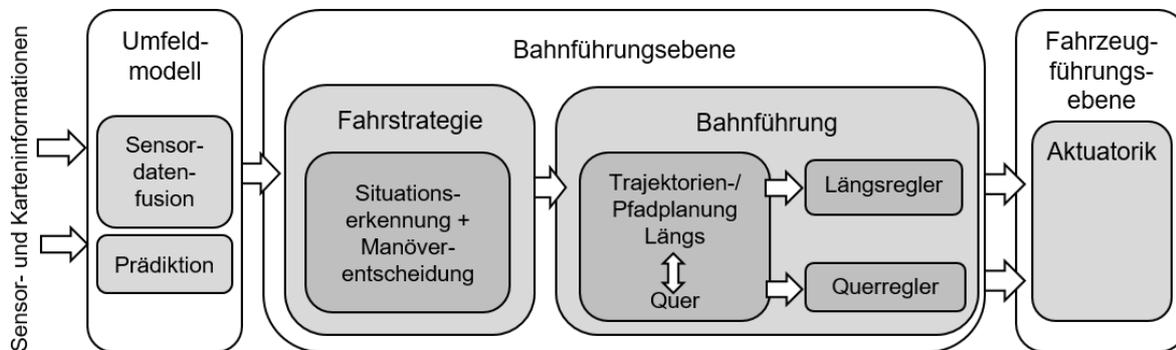


Abbildung 2.5: Systemarchitektur einer automatisierten Fahrfunktion nach [KRAUSE 2015]

Das automatisierte Fahren wird in verschiedene Stufen eingeteilt, je nachdem welche Umfänge der Fahraufgabe das System übernimmt und für welche Aufgaben der Fahrer verantwortlich ist. Hierfür existieren unterschiedliche Nomenklaturen. Die Tabelle 2.1 beinhaltet die Einteilungen der SAE [SAE INTERNATIONAL 2018] sowie der BAST [GASSER ET AL. 2012] mit den deutschen Begriffen. Grundsätzlich ist das Verständnis und die Benennung allerdings sehr ähnlich. Während teilautomatisierte Fahrfunktionen schon in vielen Fahrzeugen verfügbar sind und den Fahrer nur bei der Fahraufgabe unterstützen, bedeutet das hochautomatisierte Fahren einen ersten Schritt hin zur Übergabe der Verantwortung vom Fahrer auf das System. Die vollständige Automatisierung ist die Stufe, die häufig auch als autonom bezeichnet wird. Dies ist die Endstufe der Entwicklung, in der es keines Fahrers mehr

bedarf. In den Zwischenstufen wird ein Fahrer als Rückfallebene benötigt, für den Fall, dass das System an Grenzen kommt. In diesen Stufen müssten Fahrer die Fahraufgabe übernehmen, wenn das System dies meldet, weil beispielweise eine Situation zu komplex ist, als dass das System selbst eine Entscheidung treffen kann. Vor allem die Stufen der bedingten und hohen Automatisierung werden stark diskutiert, da es umstritten ist, wie sinnhaft in komplexen Situationen eine Übergabe der Verantwortung an einen Fahrer ist, welcher sich zuvor vom Verkehrsgeschehen abwenden durfte.

Tabelle 2.1: Definition der Stufen der Automatisierung von Fahrzeugen nach unterschiedlichen Institutionen nach [DORNIER CONSULTING INTERNATIONAL 2017]

SAE-Level	SAE-Bezeichnung	SAE-Definition	Lenkung, Beschleunigung, Bremsung		Auffassung von Fahrumgebung	dynamische Fahraufgaben	Deutschland, BAST-Nomenklatur
menschlicher Fahrer überwacht die Fahrumgebung							
0	<i>keine Automatisierung</i> (no automation)	Vollzeit-Performance des menschlichen Fahrers in allen Aspekten des dynamischen Fahrens	menschlicher Fahrer		menschlicher Fahrer	menschlicher Fahrer	Driver only
1	<i>Fahrerunterstützung</i> (Driver Assistance)	fahrmoduspezifische Ausführung eines Fahrerunterstützungssystems bei entweder Lenkung oder Beschleunigung und Bremsung	System und	menschlicher Fahrer	menschlicher Fahrer	menschlicher Fahrer	assistiert
2	<i>Teilautomatisierung</i> (Partial Automation)	fahrmoduspezifische Ausführung eines Fahrerunterstützungssystems oder mehrerer Fahrerunterstützungssysteme bei sowohl Lenkung als auch Beschleunigung und Bremsung; der menschliche Fahrer übt alle weiteren Aspekte des dynamischen Fahrens aus	System		menschlicher Fahrer	menschlicher Fahrer	teil-automatisiert
System überwacht die Fahrumgebung							
3	<i>bedingte Automatisierung</i> (Conditional Automation)	Ausführung eines autonomen Fahrsystems in allen Aspekten des dynamischen Fahrens; der menschliche Fahrer greift in Bedarfsfällen ein	System		System	menschlicher Fahrer	hoch automatisiert
4	<i>hohe Automatisierung</i> (High Automation)	Ausführung eines autonomen Fahrsystems in allen Aspekten des dynamischen Fahrens; der menschliche Fahrer greift nicht ein	System		System	System	voll automatisiert
5	<i>vollständige Automatisierung</i> (Full Automation)	Ausführung eines autonomen Fahrsystems in allen Aspekten des dynamischen Fahrens unter allen Straßen- und Umweltbedingungen; der menschliche Fahrer greift nicht ein	System		System	System	/

Ein bedeutsamer Begriff hierbei ist die sogenannte *Operational Design Domain* (ODD). In den Automatisierungsstufen unterhalb der Stufe 5 können die automatisierten Systeme im bestimmten Anwendungsfall automatisiert agieren. Dieser Anwendungsfall wird über die ODD bestimmt. Als ODD definiert die SAE in J3016 „Betriebsbedingungen für das ein Fahrautomatisierungssystem ausgelegt ist“. Die Definition kann unter anderem umgebungsbedingte, geografische und tageszeitliche Beschränkungen und/oder das erforderliche Vorhandensein oder Fehlen bestimmter Verkehrs- oder Straßenmerkmale beinhalten. [SAE INTERNATIONAL 2018]. Welcher Definitionen es bedarf, um ODD für automatisierte Fahrzeuge zu bestimmen, ist auch Thema verschiedener Forschungsarbeiten. CZARNECKI [2018] beschäftigt sich in seiner Arbeit mit der Modellierung der ODD und definiert darin auch Modelle, um das Ego-Fahrzeug und seine Umgebung darzustellen. Auch dabei wird wieder auf Situationen und Szenarien eingegangen, die in diesem Umfeld vorkommen können. Besteht darüber ein Modell, kann auch abgeschätzt werden, wie häufig die jeweiligen Situationen auftreten und welche Gefahren mit welchen Folgen bestehen. Dies kann wiederum genutzt werden, um eine Risikoabschätzung vorzunehmen.

Für das automatisierte Fahren unterschiedlicher Stufen werden auch verschiedene Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten gestellt. Dies wird in den folgenden Abschnitten, in denen die Komponenten detaillierter vorgestellt werden, diskutiert.

2.3.1 Sensorik automatisierter Fahrzeuge

Damit ein Fahrzeug sich automatisiert in der Umgebung bewegen kann, gilt es zunächst die Umgebung zu erfassen. Hierfür sind Sensoren nötig. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren, die auf verschiedenen Technologien und physikalischen Eigenschaften beruhen. Da die Umgebung eines Fahrzeugs aus verschiedenen Objekten und Materialien besteht und in verschiedene Richtungen unterschiedlich weit und detailliert erfasst werden muss, besteht die Auffassung, dass es nicht ausreichend ist, lediglich eine Art von Sensorik zu verwenden. Im Folgenden werden die verschiedenen zurzeit in Fahrzeugen eingesetzten Sensoren für das automatisierte Fahren genannt und ihre Eigenschaften und Nutzung kurz erläutert.

Für die Eigenlokalisierung von Fahrzeugen werden aus der *Odometrie* errechnete Daten verwendet. Als Odometrie wird die Lageschätzung von bodengebundenen Fahrzeugen durch seine eigene Bewegung bezeichnet. Das heißt, es wird beispielsweise die Position anhand der Radumdrehungen geschätzt. Da dies häufig ungenau ist, werden weitere Systeme, wie GPS verwendet. Auch das Erkennen von bekannten und in hochgenauen Karten verorteten Landmarken spielt bei der Eigenpositionierung eine immer größere Rolle, da die vorher genannten Systeme nicht präzise genug sind. [KRZIKALLA ET AL. 2014]

Fahrdynamikssensoren übermitteln Informationen über die Dynamik des Egofahrzeuges. Hierzu gehören zum Beispiel die Raddrehzahl, der Lenkradwinkel oder die Beschleunigung

[MÖRBE 2015]. Die Sensoren sind in den Fahrzeugen verbaut und dienen zum Beispiel Systemen wie dem bereits in Kapitel 2.2.3 erwähnten ABS, welches serienmäßig in allen neueren Fahrzeugen verfügbar sind. [ROBERT BOSCH GMBH 2004]

Radar (Radio Detection and Ranging) Sensoren senden elektromagnetische Wellen aus und empfangen die durch Objekte reflektierten Wellen wieder. Durch den Doppler-Effekt können so beispielsweise Relativbewegungen von Objekten relativ zur Eigenbewegung berechnet werden. Es wird zwischen dem Nahbereichsradar (Short Range Radar, kurz SRR) mit geringerer Frequenz und größerem Abstrahlwinkel und dem Fernbereichsradar (Long Range Radar, kurz LRR), welcher eine höhere Frequenz hat und Objekte in einer Entfernung von bis zu 250m detektiert, unterschieden. [WINNER 2015]

Ultraschallsensorik wird für die Detektion von Objekten im Nahbereich (Entfernung von wenigen Metern) genutzt. Sie finden in Parkassistenzsystemen und dem Totwinkelassistenten Anwendung. Hierbei werden Schallwellen oberhalb des für den Menschen hörbaren Frequenzbereiches ausgesandt und von Objekten in der Umgebung reflektiert, absorbiert, gestreut oder hindurchgelassen. Daraus kann die Präsenz von Objekten abgeleitet werden. Der Abstand zum Objekt wird nach dem Puls/Laufzeitprinzip errechnet. [NOLL UND RAPPS 2015]

LIDAR (Light Detection and Ranging) wird in automatisierten Fahrzeugen immer häufiger verwendet, da die Technologie robuster ist als Radar. Hierbei werden Ultraviolett-, Infrarotstrahlen oder Strahlen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts ausgesendet und mit Hilfe der Time of Flight Methode die Position von Objekten berechnet. Wiederum geschieht dies aus der Messung der Zeit bis zum Empfang von einem reflektierten Signal, welche proportional zur Entfernung ist. Mit dem LIDAR können mehrere Objekte gleichzeitig erfasst werden. Durch eine erhöhte Dämpfung der Atmosphäre, wie beispielsweise bei Nebel, kann das Messen allerdings erschwert werden. [GOTZIG UND GEDULD 2015]

Per *Kamera* und nachfolgender Bildverarbeitung können Klassifikationen von Objekten verbessert werden. Durch Nutzung von maschinellen Lernverfahren können Objekte in Bildern wiedererkannt werden, wenn ein Training auf solche Objekte erfolgt ist. Distanzen und Geschwindigkeiten können allerdings aus Kamerabildern nur grob geschätzt werden. Besser kann dies mit einer Stereo-Kamera realisiert werden, also einer Kamera mit zwei Objektiven, die gleichzeitig aus zwei verschiedenen Winkeln Bilder aufnehmen und so 3D Bilder generieren, ähnlich wie bei den menschlichen Augen. Durch das 3D Bild ist eine bessere Schätzung von Abständen und Geschwindigkeiten der Objekte möglich, allerdings weiterhin nicht so verlässlich, wie mit den zuvor genannten Sensoren. [PUNKE ET AL. 2015] Da herkömmliche Kameras bei Dunkelheit nicht gut funktionieren, werden auch Kameras verwendet, die Infrarotstrahlung empfangen können. Diese Wärmebildkameras können über die Temperaturunterschiede Objekte in der Umgebung wahrnehmen [KHANH UND HUHN 2015].

In Abbildung 2.6 sind die verschiedenen Sensoren beispielhaft abgebildet. Es wird deutlich, dass daraus ein 360° Abbild der Umgebung des Fahrzeugs entstehen kann, jedoch nicht unbedingt in jede Richtung bis in die gleiche Entfernung detektiert wird.

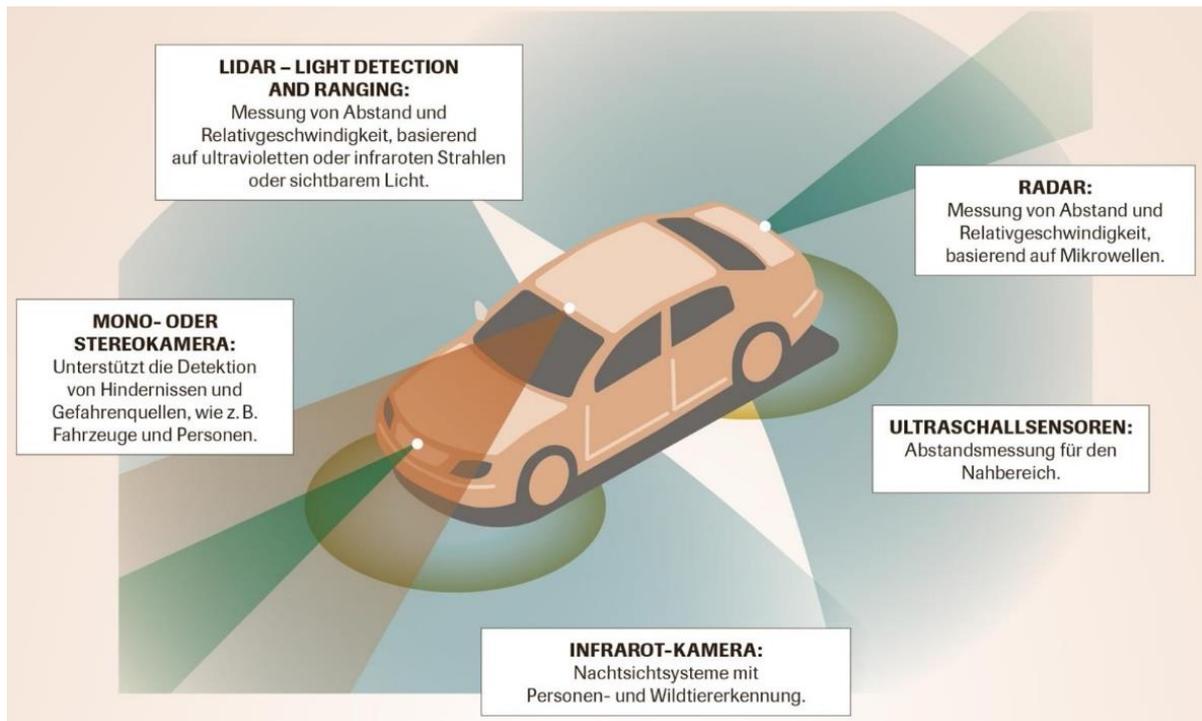


Abbildung 2.6: Schematische Abbildung und Funktion der Sensoren und deren Abdeckung für Fahrerassistenzsysteme aus [VDA 2018a]

Neben den bordeigenen Sensoren im klassischen Sinne, kann die Sensorik auch aus kommunikationsfähigen Geräten bestehen. Wenn das Fahrzeug in der Lage ist mit der Umgebung, beispielsweise anderen Fahrzeugen (Car to Car Communication, C2C) oder der Infrastruktur (Car to Infrastructure, C2I) oder auch einem Server des Fahrzeugherstellers (Backend) zu kommunizieren, können ebenfalls Informationen über die Umgebung, in der sich das Fahrzeug bewegt, gewonnen werden. So kann beispielsweise Infrastruktur wie eine Lichtsignalanlage direkt übermitteln, welchen Status der für das Fahrzeug relevante Signalgeber gerade zeigt. Eine Bilderkennung wäre somit dafür nicht mehr notwendig. Da bisher die Schnittstellen und die Datenformate noch nicht standardisiert sind, gibt es bisher wenige C2C und C2I Implementierungen. Dagegen werden häufig hochgenaue digitale Karten verwendet, in denen präzise Positionsdaten von Objekten wie Fahrstreifenmarkierungen und Verkehrsschildern gespeichert sind. Aktualisierte Informationen können im Backend gespeichert werden, welche die Fahrzeuge abrufen können. Mit einem Abgleich der aktuellen Position des Fahrzeuges, kann so ausgelesen werden, wie die Infrastruktur in der Umgebung aussieht. [FUCHS ET AL. 2015], [KLANNER UND RUHAMMER 2015]

Positionsdaten werden zumeist über GPS gewonnen, ein weiterer Sensor, welcher in Fahrzeugen für etliche Funktionen verfügbar ist. Dieses System benötigt Empfang zu ausreichend Satelliten, um die Position des Fahrzeuges zu ermitteln. Da häufig nur wenige Satelliten zur Verfügung stehen und es durch die Annahmen in der Berechnung Fehler gibt, ist GPS oftmals nur auf einige Meter genau. Abhilfe schaffen weitere Satelliten oder eine hochgenau vermessene Position auf der Erde, zu der die Relation gemessen werden kann, eine sogenannte

Referenzstation. In diesem Verfahren, das sogenannte differentielle Globale Positionierungssystem (dGPS), werden Korrekturdaten ausgestrahlt und so die Genauigkeit des herkömmlichen GPS erhöht. [WEGENER ET AL. 2014]

Da alle Sensoren in gewissen Aspekten Schwächen aufzeigen, wird mit der Sensordatenfusion daran gearbeitet, die Vorteile einzelner Sensoren zu nutzen und so ein bestmögliches Abbild des Umfeldes zu erhalten [DARMS 2015]. Abschnitt 2.3.2 beschreibt das Umfeldmodell automatisierter Fahrzeuge genauer.

2.3.2 Umfeldmodell automatisierter Fahrzeuge

Aus den Daten, die die einzelnen Sensoren des Fahrzeugs liefern, muss eine Repräsentation der Umwelt entstehen, sodass das Fahrzeug darin navigiert werden kann. Unter einem Fahrzeugumfeldmodell „versteht man eine dynamische Datenstruktur, in der alle relevanten Objekte und Infrastrukturelemente in der Nähe des eigenen Fahrzeugs möglichst korrekt in Ort und Zeit in einem gemeinsamen Bezugssystem enthalten sind“ [DIETMAYER ET AL. 2015]. Es wird zwischen der objektbasierten und der rasterbasierten Methode unterschieden. Während die rasterbasierte Methode sich gut für die Repräsentation der statischen Fahrumgebung eignet, ist die objektbasierte Methode eher für dynamische Objekte geeignet, indem jedes Objekt modellhaft beschrieben wird. Auf Basis der Modelle werden Zustände der Objekte geschätzt. Als Ergebnis ergibt sich das Umfeldmodell, welches in einer Objektliste alle Objekte in der Umgebung enthält. Das Ergebnis der rasterbasierten Methode ist das sogenannte Occupancy Grid (Belegungsgitter), in dem für jedes Feld des Rasters eine Information über dessen Belegung vorhanden ist. [DIETMAYER ET AL. 2015]

In Abbildung 2.7 sind Klassen der Umfeldmodellierung beispielhaft dargestellt. Hierbei zeigt das linke Bild das Umfeld welches modelliert werden soll. Rechts davon ist das Ergebnis der objektbasierten Modellierung in Form einer Objektliste dargestellt. Rechts davon sind sog. Features abgebildet, welche ebenfalls einzelne Punkte im Raum mit bestimmten Eigenschaften darstellen. Das Belegungsgitter ist in der zweiten Abbildung von rechts dargestellt. Ähnlich hierzu ist die Abbildung ganz rechts, welche ein baumbasiertes Modell darstellt. Im Gegensatz zum Belegungsgitter ist in diesem Fall die Größe der Zellen des Gitters nicht fest vorgegeben, sondern kann je nach Bedarf angepasst werden. So kann Rechenkapazität eingespart werden. [HEIGELE ET AL. 2015]

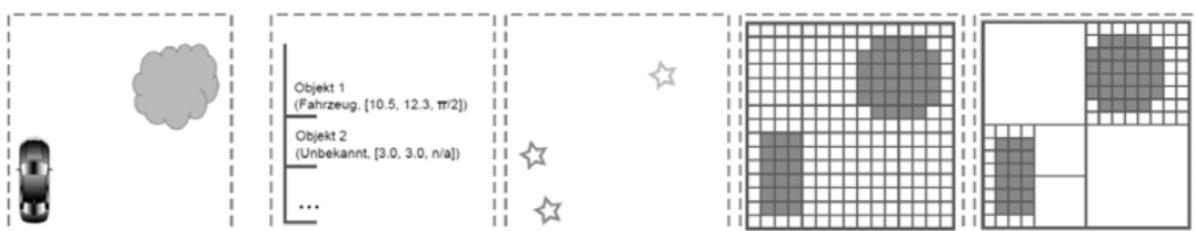


Abbildung 2.7: Beispielhafte Darstellung der Klassen der Umfeldmodellierung aus [HEIGELE ET AL. 2015]

Aus dem Modell des Umfeldes soll abgeleitet werden, in welcher Situation sich das Fahrzeug befindet. Dazu müssen die richtigen Informationen zur Verfügung stehen, um die Fahrsituation und auch relevante Teile der Verkehrssituation (vgl. Abschnitt 2.1.2) zu erkennen. PELLKOFER [2003] verwendet eine spezielle multifokale Kamera um das aktive Sehen mit Blickrichtungssteuerung des Menschen nachzustellen und so auf solche Aspekte der Umgebungserkennung näher eingehen zu können, die in der jeweiligen Situation relevant sind.

Die Situationen aus den Informationen im Umfeldmodell korrekt zu interpretieren und daraus Handlungen anzuleiten, erfolgt in der Ebene der Fahrstrategie. Kapitel 2.3.3 beschreibt diese Ebene genauer.

2.3.3 Fahrstrategie automatisierter Fahrzeuge

Auf Basis der fusionierten Informationen aus dem Fahrzeugumfeld, müssen die Situationen erkannt und interpretiert werden sowie daraus eine Entscheidung für das Verhalten des automatisierten Fahrzeugs im nächsten Zeitschritt getroffen werden. Hierfür müssen die strategischen Ziele des Eigenfahrzeugs berücksichtigt werden und die Aktionen der anderen Verkehrsteilnehmer prädiziert werden. Die Fahrstrategie beinhaltet taktische Entscheidungen auf der Führungsebene. So wird beispielsweise entschieden, ob ein Fahrstreifenwechsel durchzuführen ist oder eine Kreuzung passiert werden kann. Auf dieser Basis werden Zielgrößen für die nachgelagerte Pfad- und Trajektorienplanung festgelegt. Der Begriff Fahrstrategie wird daher nicht so häufig verwendet, insbesondere, da strategische Entscheidungen nach dem Drei-Ebenen Modell von DONGES [1982] eher Entscheidungen wie Navigationsziele betreffen, die Minuten im Voraus getroffen werden. Nach AEBERHARD ET AL. [2015] entscheidet die Fahrstrategie das auszuführende Manöver basierend auf der vorherrschenden Verkehrssituation und den Verkehrsregeln. Dabei werden auch die Intentionen und globalen Ziele, wie das Navigationsziel, berücksichtigt.

VACEK [2009] nutzt für die Entscheidungsfindung fallbasiertes Schließen, in seiner Arbeit beschreibt er, wie eine Wissensbasis von Verkehrssituationen angelegt werden kann, worauf basierend Situationen erkannt und mögliche Folgesituationen abgeleitet werden. Mit Hilfe des Erfahrungswissens aus früher erlebten Situationen des Systems und zugehöriger Bewertung der einzelnen Situationen wird dann ein Gütemaß berechnet. Dieses Maß dient als Grundlage der Verhaltensentscheidung. Es identifiziert, welche Situationen vermieden werden sollten und welche erstrebenswert sind.

In vielen Anwendungen basiert die Verhaltensentscheidung auf Zustandsautomaten (engl. state machines), in denen alle möglichen Zustände des Systems zunächst definiert werden müssen und eine Entscheidung auf Basis von Kostenfunktionen gefunden wird. Hierfür ist es immer auch relevant, die Situation korrekt zu interpretieren und zu prädizieren. [MATTHAEI ET AL. 2015] Häufig werden erst die Entscheidungsalternativen eruiert und dann abhängig von der Situation jeder Entscheidung ein Nutzen zugeordnet. Die Entscheidung mit dem höchsten

Nutzen wird gewählt. Ein minimales beispielhaftes Entscheidungsnetz ist in Abbildung 2.8 dargestellt. [SCHUBERT 2014]

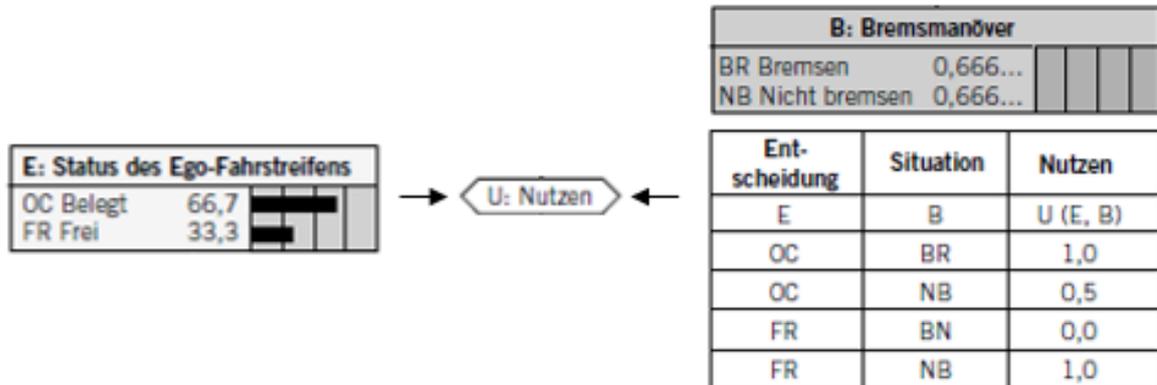


Abbildung 2.8: Beispielhaftes Entscheidungsnetz auf der Fahrstrategieebene nach [SCHUBERT 2014]

Auch in GREWE ET AL. [2014] wird beschrieben, wie ein Entscheidungsnetz, welches aus Entscheidungs-, Nutzen- und Wahrscheinlichkeitsknoten besteht, dazu verwendet werden kann zu entscheiden, welche Aktion ein Fahrzeug (zum Beispiel Bremsen oder nicht Bremsen, Fahrstreifen wechseln oder nicht wechseln) als nächstes auszuführen hat. Dabei wird numerisch bewertet, ob eine Entscheidung in einer bestimmten Situation erstrebenswert ist. Nach Kriterien wie Komfort oder Sicherheit, kann ein Nutzen für die verschiedenen Entscheidungsoptionen berechnet werden. Das Entscheidungsnetz ergibt also einen Erwartungswert für den Nutzen der Entscheidungsalternativen. Es wird wiederum aus einer Reihe von Alternativen diejenige mit dem größten Nutzen gewählt.

Je komplexer die Szenarien werden, desto mehr Entscheidungsalternativen stehen zur Verfügung und mögliche Zustände müssen im Modell abgebildet werden. In GOEBL ET AL. [2008] wird Fuzzylogik verwendet um die Anzahl der möglichen Zustände zu reduzieren. Da in den Zustandsautomaten aber immer nur eine endliche Anzahl möglicher Zustände des Systems abgebildet werden können, entwickelten HUBMANN ET AL. [2016] einen generischen Ansatz für Fahrstrategien im urbanen Raum, der nicht regelbasiert ist und unter einer unendlichen Menge an impliziten Manövern wählen kann. Dabei können schnell unvermeidbare Kollisionszustände errechnet und als Heuristik für einen gerichteten A* Algorithmus verwendet werden.

In der Arbeit von PELLKOFER [2003] werden Verkehrssituationen linguistisch beschrieben. Jede Situation wird durch eine Reihe an Aspekten beschrieben, die durch logische UND oder ODER miteinander verknüpft sind. Des Weiteren wird eine sogenannte unscharfe Regelbasis formuliert, in der jeder Situationsumschreibung mittels WENN-DANN-Regeln ein situationsgerechtes Verhalten entsprechend der Mission des Fahrzeugs, zugeordnet wird. Das kann beispielsweise das Folgen der Straße oder das Abbiegen an einem Wegpunkt sein.

Bei der taktischen Entscheidung für Manöver muss immer auch betrachtet werden, dass die Eingangsgrößen aus dem Umfeldmodell oder den Sensoren fehlerbehaftet sein können und auch die Prädiktion der Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer Unsicherheiten beinhaltet. Markov-Entscheidungsprobleme berechnen ebenfalls Nutzen aus einer Kette von Entscheidungen. Um den genannten Problemen Rechnung zu tragen, werden in ULBRICH UND MAURER [2013] partiell beobachtbare Markov-Entscheidungsprozesse (POMDP) verwendet.

SCHRÖDER [2009] vergleicht in seiner Arbeit verschiedene Herangehensweisen bei der Verhaltensplanung und stellt fest, dass es zu bevorzugen ist, regelbasierte Ansätze (anstatt maschinellen Lernverfahren) dafür zu verwenden, um Regelungen wie sie in der StVO enthalten sind, explizit zu modellieren. Ansätze mit maschinellen Lernverfahren werden in letzter Zeit jedoch häufiger verwendet. Für einige Fahrsituationen wurde bewiesen, dass sie komplexe regelbasierte Ansätze übertreffen können. [MIRCHEVSKA ET AL. 2018]

Es besteht nicht in allen Systemen eine klare Trennung von der Fahrstrategie zur Bahnplanungsebene, prinzipiell muss jedoch zunächst grob ein Manöver entschieden werden und dies dann in eine konkrete Trajektorie umgesetzt werden, wobei genau berechnet wird, an welchem Ort sich das Fahrzeug zu welcher Zeit befinden soll. Diese Aufgabe übernehmen die Pfad- und Trajektorienplanung, welche im Kapitel 2.3.4 erläutert sind.

2.3.4 Pfad- und Trajektorienplanung automatisierter Fahrzeuge

Nachdem eine Fahrstrategie für das automatisierte Fahrzeug festgelegt wurde und damit über das nächste Manöver entschieden wurde, muss geplant werden, auf welchem Pfad das Ziel erreicht wird und welche konkrete Trajektorie dafür geeignet ist. Eine Trajektorie gibt den Weg des Fahrzeugs mit zugehöriger Zeit wieder. Es wird also im Gegensatz zur Pfadplanung nicht nur geplant auf welchem Weg das Fahrzeug den Zielpunkt erreicht, sondern auch mit welchem Geschwindigkeitsprofil. [RATHGEBER 2016]

Innerhalb der *Pfadplanung* wird zunächst nur ein möglicher Pfad zum Beispiel durch einen kürzeste Wege Algorithmus berechnet. Dabei können auch Objekte und Hindernisse betrachtet werden. Es gibt verschiedene Ansätze einen Pfad zwischen Start und Ziel zu errechnen. In Abbildung 2.9 sind drei Konzepte dargestellt. Zunächst kann der Bewegungsraum durch eine Gitterstruktur diskretisiert werden. Dann wird durch Suchalgorithmen bestimmt, ob Übergänge von einer Zelle in die nächste möglich sind und ob diese zum Ziel führen (a in Abbildung 2.9). Es kann auch von einem Punkt aus inkrementell vorgegangen werden, wobei von einem Start mögliche Folgetrajektorien berechnet werden und bewertet wird, ob dies zum Zielpunkt führt. In dieser sogenannten Potenzialfeldmethode haben Hindernisse eine abstoßende Kraft und der Zielpunkt eine anziehende Kraft, dies wird durch die Bewertungen der möglichen Trajektorien realisiert (b in Abbildung 2.9). Ein erweiterter Ansatz davon ist die Baumsuche (c in Abbildung 2.9), die ähnlich zur Potenzialfeldmethode funktioniert, jedoch alle möglichen Pfade solange verfolgt, bis ein gültiger Pfad zum Ziel führt. [EFFERTZ 2009] Zwischen den Wegpunkten muss dann eine Trajektorie gewählt werden.

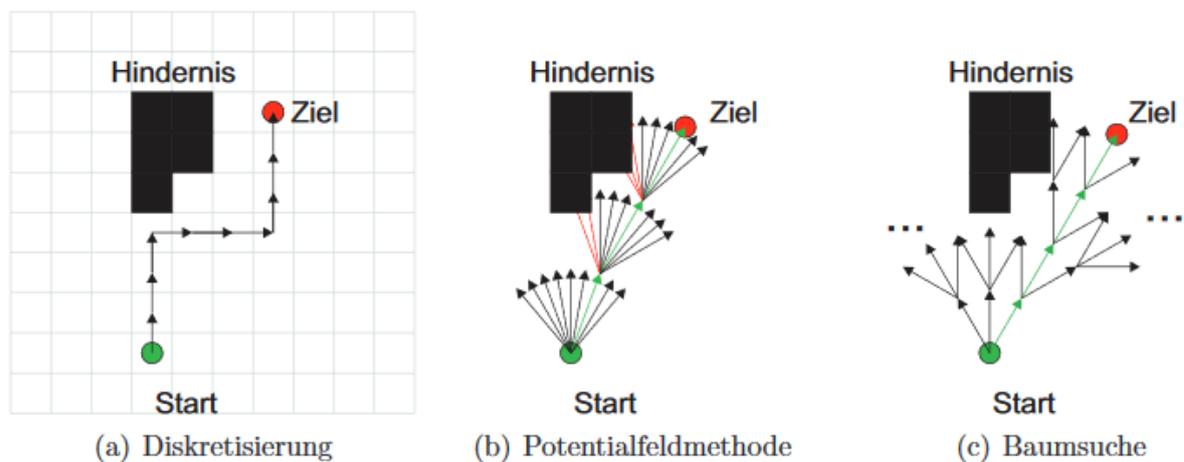


Abbildung 2.9: Konzepte der Bahnplanung aus [EFFERTZ 2009]

Bei der *Trajektorienplanung* wird zwischen Verfahren für unstrukturierte Umgebungen, wie Parkplätze, und strukturierte Umgebungen, wie Autobahnen, unterschieden. [MATTHAEI ET AL. 2015] Als Trajektorien werden mit einem Optimierungsalgorithmus Funktionen wie Polynome oder Splines berechnet. Dabei wird zunächst eine Schar an möglichen Trajektorien berechnet und dann mit Hilfe eines Gütefunktional, welches die gewichteten Kosten enthält, die optimale Trajektorie ausgewählt. Hierbei kann beispielsweise widerspiegelt werden, dass das Ziel möglichst schnell oder mit möglichst wenig Ruck erreicht werden soll. Wird die Fahrt auf der gewählten Trajektorie umgesetzt, kann das Optimierungsproblem zyklisch unter Rückführung der gemessenen Zustände gelöst werden, hierbei wird von modellprädiktiver Regelung gesprochen. [RATHGEBER 2016]

In Abbildung 2.10 wird beispielhaft eine Trajektorien­schar dargestellt, die mögliche Trajektorien auf dem Pfad darstellen. Dabei ist die grüne Trajektorie die optimale, während der Verlauf von gelb nach rot die steigenden Kosten nach dem zu Grunde liegenden Kostenfunktional darstellt. [WERLING 2011]

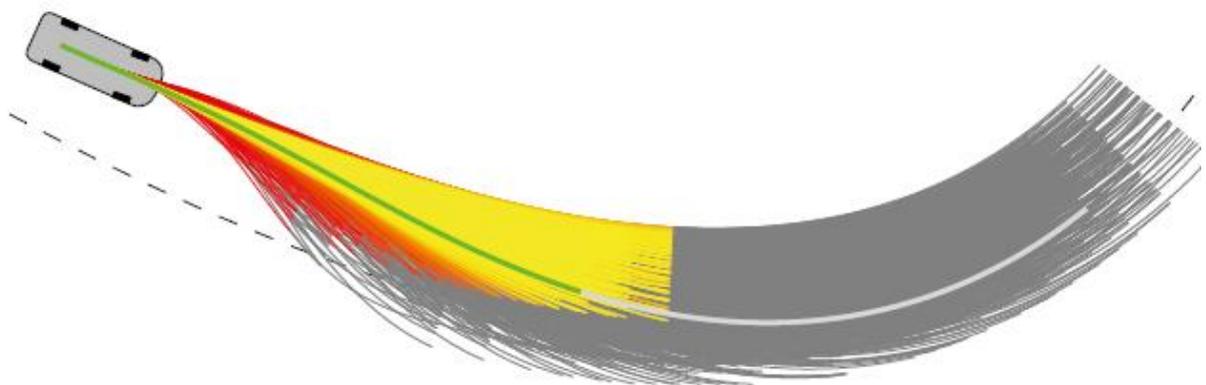


Abbildung 2.10: Trajektorien­schar für einen geplanten Pfad mit optimaler Trajektorie (grün), von gelb nach rot ansteigende Kosten, in grau werden die farbigen Trajektorien weiter in die Zukunft geplant aus [WERLING 2011]

Um das Fahrzeug auf der gewählten Trajektorie zu führen, bedarf es einer sogenannten Trajektorienfolgeregelung. Hierbei muss insbesondere Störungen wie beispielsweise Wind, die von außen auf das System wirken, entgegengewirkt werden. Die Längs- und Querregelung wird dabei häufig separat betrachtet (vgl. Abbildung 2.5). Dies entspricht der Stabilisierung des Fahrzeugs gemäß Abbildung 2.3.

Aus der gewählten Trajektorie müssen Stellwerte für die Fahrzeugführung errechnet werden und an die entsprechenden Aktuatoren Antrieb, Bremse und Lenkung gesendet werden. Dies geschieht in der nachgelagerten Fahrzeugführungsebene, die im folgenden Kapitel 2.3.5 beschrieben wird.

2.3.5 Fahrzeugführung automatisierter Fahrzeuge

In der Fahrzeugführungsebene wird das Fahrzeug durch die Aktuatoren, das heißt die Lenkung, den Antrieb und die Bremse, bewegt. Es erfolgt eine Berechnung der benötigten Beschleunigung und des Lenkwinkels, um das Fahrzeug auf der geplanten Trajektorie zu bewegen. Die Fahrzeugführungsebene gehört auch zur Stabilisierungsebene und entspricht der in Abbildung 2.3 dargestellten untersten Ebene.

Für die Berechnung der Stellgrößen für die einzelnen Aktuatoren sind die Eigenschaften des Fahrzeugs zu beachten. Für die Darstellung von Pkw wird vereinfacht häufig ein Einspurmodell nach RIEKERT UND SCHUNCK [1940] für das Fahrzeug angenommen. Dabei wird ein Pkw als einspurig modelliert, das heißt, dass die Räder der Vorder- und der Hinterachse zu je einem Rad in der Fahrzeugmitte vereint werden. Einige Eigenschaften, wie die Masse oder der Schwerpunkt des Fahrzeugs, können mit dem Modell dargestellt werden, andere werden vereinfacht. Diese Darstellung vereinfacht das Rechnen, führt jedoch trotzdem zu relativ präzisen Ergebnissen. Auch für das dynamische Verhalten in Quer- und Längsrichtung müssen Annahmen getroffen und in einem Modell dargestellt werden, ebenso werden Modelle für die Beschreibung der Reifeneigenschaften verwendet.

Regler übernehmen die Aufgabe, die korrekten Stellwerte zu errechnen, damit die gewählte Trajektorie durch das Fahrzeug umgesetzt werden kann. So ergibt sich aus der Berechnung der Trajektorie und der aktuellen Fahrzeugposition beispielsweise eine Sollkrümmung für den nächsten Zeitschritt. Dieser muss dann durch einen Lenkwinkelregler in einen Solllenkwinkel umgerechnet werden, welchen die Lenkung dann umsetzen kann. Bei Fahrerassistenzfunktionen kann der Fahrer in die Fahrzeugführung eingreifen und ebenfalls einen Lenkwinkel eingeben (Lenkrad betätigen), dies muss dann von der Regelung mitberücksichtigt werden.

Einige solcher Systeme befinden sich bereits in den Fahrzeugen, während höhergradig automatisierte Fahrzeuge noch entwickelt werden. Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über den aktuellen Stand der Entwicklung beim automatisierten Fahren liefern.

2.3.6 Automatisierte Fahrfunktionen – Stand der Entwicklung

Einige automatisierte Fahrfunktionen werden bereits serienmäßig in neuen Fahrzeugen angeboten, während andere bisher nur in Konzepten oder Prototypen existieren. Dieser Abschnitt soll einen kurzen Überblick über den Stand der Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen geben.

Fahrerassistenz kann auf den unterschiedlichen Ebenen der Fahraufgaben geschehen. Sie kann von der reinen Assistenz, also dem Unterstützen des Fahrers bei Teilaufgaben, bis hin zur Übernahme der kompletten Fahraufgabe reichen (vgl. Tabelle 2.1). Der Begriff automatisiertes Fahren wird als Oberbegriff gesehen und sowohl für Fahrerassistenzsysteme als auch das autonome Fahren verwendet. Weil Assistenz bei der Fahraufgabe auf den unterschiedlichen Ebenen geschehen kann, werden sowohl Navigationsgeräte, die auf der strategischen Ebene unterstützen, als Fahrerassistenzsysteme bezeichnet, als auch Systeme, die in die Führungs- und Stabilisierungsaufgabe eingreifen.

Als Beispiel für ein System der Fahrerunterstützung gilt der Abstandsregeltempomat, welcher in die Längsführung eingreift und die Geschwindigkeit sowie einen vorbestimmten Abstand zum Vorderfahrzeug einhält. Als teilautomatisiertes System gilt beispielsweise der Parkmanöverassistent, welcher das komplette Parkmanöver ausführt, der Mensch muss das System allerdings jederzeit überwachen und kann das Manöver abbrechen oder übersteuern.

Hochautomatisierte Systeme wie der sogenannte AutobahnpiLOT oder der Staupilot, welcher in seinem Einsatzgebiet (z.B. auf der Autobahn) die Längs- und Querverführung des Fahrzeugs übernimmt, während sich der Fahrer vom Geschehen abwenden darf, sind mit der Auflage zugelassen, dass der Fahrer mit ausreichender Zeitreserve dazu aufgefordert wird, wenn es erforderlich wird, die Fahrzeugführung wieder zu übernehmen (§1a StVG). Die Übergabezeit wird allerdings noch kritisch diskutiert, da identifiziert werden muss, wie viel Zeit ein Fahrer benötigt, um in einer komplexen Situation die Fahraufgabe wieder angemessen zu übernehmen [VOGELPOHL ET AL. 2018]. Erste hochautomatisierte Fahrfunktionen sind in Serienfahrzeugen bereits verfügbar.

Aktuell wird in einigen Projekten daran gearbeitet, das vollautomatisierte und fahrerlose Fahren zu implementieren und zu testen. Insbesondere in den USA gibt es einige Unternehmen, die sich vor allem mit der Entwicklung von Software für autonome Fahrfunktionen beschäftigen und neue Dienste im Mobilitätsbereich vorantreiben. So ist die Firma Waymo aus dem Projekt Google Self Driving Car heraus entstanden, in dem seit 2009 autonomes Fahren entwickelt und erprobt wird [WAYMO 2018]. Uber bietet eine Plattform für einen Fahrerservice ähnlich zu Taxis an, der in Zukunft keine Fahrer mehr benötigen soll, da diese durch das autonome System abgelöst werden sollen. Die Firma Tesla stattet ihre Fahrzeuge mit einer Menge an Sensoren und Steuergeräten aus, sodass sogar im Nachhinein Fahrfunktionen eingespielt werden können, die automatisiertes Fahren auf hohen Automatisierungsstufen erlaubt [TESLA 2019]. Es wurde jedoch auch bekannt, dass es noch einige technische Unzulänglichkeiten der Sys-

teme gibt und diese beispielsweise nicht jede Umfeldsituation korrekt erkennen oder interpretieren können. Es müssen in den Testfahrten weiterhin in etlichen Situationen Menschen eingreifen. Außerdem kam es bereits zu ersten tödlichen Unfällen durch die automatisierten Fahrzeuge. [JOHNSON UND FITZSIMMONS 2018]

Nicht nur für den (privaten) Individualverkehr ist das automatisierte Fahren interessant. In einer Reihe von Projekten werden Shuttle Services erprobt, die im städtischen Verkehr den öffentlichen Nahverkehr ersetzen oder ergänzen sollen. Dabei erhofft man sich insbesondere neue, bisher unprofitable Gebiete zu erschließen [JÜRGENS 2018]. Auch im Güterverkehr besteht ein großes Potenzial die Fahraufgabe zu automatisieren und damit Personal- und weitere Kosten einzusparen sowie die Sicherheit zu erhöhen. Erste Anwendungen der automatisierten Fahrzeugführung von Lkw, wie die automatisierte Kolonnenfahrt, wurden bereits erprobt. [RAPP TRANS AG 2017]

Nicht nur die Entwicklung der vollautomatisierten Systeme ist noch nicht abgeschlossen, auch bestehen noch einige Fragen hinsichtlich der Zulassung und Absicherung der Systeme. Das folgende Kapitel 2.3.7 geht auf diese Prozesse näher ein.

2.3.7 Zulassung und Absicherung von automatisierten Fahrzeugen

Das Straßenverkehrsgesetz (StVG) regelt, dass Kraftfahrzeuge, die in Deutschland auf öffentlichen Straßen betrieben werden sollen, zum Verkehr zugelassen werden müssen. Explizit regelt das StVG, dass Kraftfahrzeuge mittels hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen betrieben werden dürfen, wenn die Funktion bestimmungsgemäß verwendet wird. Als voll- und hochautomatisierte Fahrfunktion werden solche definiert, die die Fahrzeugführung übernehmen können, sich an die Verkehrsvorschriften halten, jederzeit durch den Fahrzeugführer manuell übersteuert oder deaktiviert werden können, die Erforderlichkeit der Übernahme der Fahrzeugführung durch den Fahrzeugführer erkennen können und dies mit ausreichender Zeitreserve dem Fahrzeugführer wahrnehmbar anzeigen können sowie auf eine der Systembeschreibung zuwiderlaufende Verwendung hinweisen können. (§1a StVG Satz 2)

Laut §1a Satz 4 StVG ist der Fahrzeugführer derjenige, der das System aktiviert hat. Dieser Fahrzeugführer darf sich laut §1b StVG zwar vom Verkehrsgeschehen abwenden, muss aber derart wahrnehmungsbereit sein, dass er die Fahrzeugführung jederzeit wieder übernehmen kann. Dies soll er unverzüglich tun, wenn das System ihn dazu auffordert oder wenn er erkennt, dass die Voraussetzungen das System zu verwenden nicht mehr vorliegen. Weiterhin müssen die Fahrzeuge mit den hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen, wie auch alle anderen Kraftfahrzeuge, zugelassen sein und auch die automatisierte Fahrfunktion muss entweder in internationalen Vorschriften (sofern diese auch in Deutschland gelten) beschrieben sein und ihnen entsprechen oder eine Typzulassung erteilt bekommen haben. (§1a Satz 3 StVG)

Die ECE-Regelung besagt, dass alle Typzulassungen, die in einem Staat, der Vertragspartei der Regelung ist, vergeben wurden, auch in allen anderen Signatarstaaten gelten. In Deutschland vergibt das Kraftfahrt-Bundesamt Typgenehmigungen für Kraftfahrzeuge. In Staaten außerhalb Europas gelten weitere Vorschriften. Die Vereinigten Staaten von Amerika, beispielsweise, erkennen die ECE-Regelung nicht an. Somit müssen Fahrzeughersteller immer einen weiteren Prozess durchlaufen, um ein Kraftfahrzeug auch in den USA zulassen zu können. Damit das Kraftfahrt-Bundesamt ein Fahrzeug zulassen kann, bedarf es eines Prüfberichtes durch ein zugelassenes Labor, dazu gehört in Deutschland beispielsweise der TÜV.

Ein Teil des Zulassungsprozesses einer automatisierten Fahrfunktion ist die funktionale Sicherheit, welche in der Norm ISO 26262 (für die Entwicklung von sicherheitsrelevanten elektronischen Steuerungssystemen) beschrieben wird [ISO 26262: 2011]. Ziel ist es, einen potenziellen Funktionsausfall des Systems zu bewerten und geeignete Maßnahmen umzusetzen, die das Restrisiko auf ein akzeptables Maß reduzieren. Es wird dafür eine Risikoanalyse durchgeführt, welche die möglichen Funktionsfehler nach Häufigkeit, Kontrollierbarkeit und Schwere der möglichen Schäden bewertet. Daraus werden für die einzelnen Funktionen Sicherheitsintegritätsanforderungen (Automotive Safety Integrity Level, ASIL) abgeleitet, welche den nötigen Umfang der Maßnahmen gegen die möglichen Fehler beschreiben. [SCHNIEDER UND HOSSE 2019]

Neben der zuvor genannten Funktionssicherheit ist auch die Gebrauchssicherheit eine wichtige Komponente im Absicherungsprozess automatisierter Fahrfunktionen. Hierbei wird die sogenannte Sollfunktionssicherheit (Safety of the Intended Functionality, SOTIF) bewertet, indem die Anwendungsfälle des Systems getestet werden und eruiert wird, ob bei bestimmungsgemäßem Gebrauch und zu erwartendem Fehlgebrauch des Systems keine intolerablen Personengefährdungen entstehen. Die Norm ISO/PAS 21448 enthält Vorgaben, um die Sicherheit der Sollfunktion (SOTIF) zu erreichen. [SCHNIEDER UND HOSSE 2019]

Der Zulassungsprozess von automatisierten Systemen sieht also eine Beschreibung der Anwendungsfälle des Systems vor. Wie im Kapitel 2.1 bereits erwähnt, kann die Zahl der möglichen Anwendungsfälle und der Sollfunktion in den einzelnen Anwendungsfällen, je nachdem wie detailliert diese beschrieben werden sollen, enorm groß werden.

Im Kontext der Freigabe von automatisierten Fahrzeugen wurden in letzter Zeit einige Forschungsprojekte gestartet, die sich mit Testverfahren und Absicherung der Fahrzeuge beschäftigen. Um den Aufwand für das reale Testen der Systeme zu verringern, beschäftigen sich einige Projekte damit, Testszenarien zu definieren. Das deutsche Projekt PEGASUS (Projekt zur Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen) zielt darauf ab, generell akzeptierte Testkriterien zu definieren sowie Tools und Methoden zu entwickeln und Szenarien und Situationen zur Absicherung automatisierter Fahrfunktionen zu definieren [FORM 2017]. ENABLE-S3 ist ein europäisches Projekt, welches es zum Ziel hat, die Kosten für die Absicherung von hochautomatisierten cyberphysischen Systemen zu reduzieren, indem

eine bestmögliche Kombination aus Simulation und realen Tests ausfindig gemacht werden soll [LEITNER 2016]. Das Projekt MOVE_UK soll den Absicherungsprozess automatisierter Fahrzeuge verbessern, indem die Analyse von Big Data zum Einsatz kommt [SEIDL ET AL. 2018]. Weiterhin existiert ein Projekt namens 'Streetwise', welches aus der Beobachtung von Verkehr und Fahrzeugdaten Szenarien ableitet. Algorithmen detektieren Events in den Daten und bauen so Testszenarien auf [KALISVAART 2016].

Erste automatisierte Shuttle-Fahrzeuge werden bereits in verschiedenen Testgebieten eingesetzt und erprobt. Da die Typgenehmigungen für solche Fahrzeuge noch nicht vorhanden sind, mussten die verantwortlichen nationalen Institutionen dafür Regelungen schaffen. In Deutschland ist der TÜV eine Institution die verantwortlich für die Vergabe solcher Ausnahmegenehmigungen ist. Für das erste automatisierte Shuttle in Deutschland, welches in Bad Birnbach auf öffentlichen Straßen Passagiere transportiert, wurde ein generischer Prozess erstellt, um diese Genehmigung zu erteilen. Dazu gehörte es, alle Situationen in die das Shuttle auf der vordefinierten Teststrecke kommen konnte, aufzuzeigen. Dafür mussten alle möglichen Situationen gelistet werden und die jeweiligen Aktionen des Fahrzeugs in den Situationen beschrieben werden. [MATAWA 2018] Einen ähnlichen Prozess wählte die niederländische Institution RDW für erste Testfahrzeuge im niederländischen Verkehr.

Auf Grund der großen Datenmenge die im Absicherungsprozess benötigt wird, wird vermehrt vorgeschlagen, Datenbanken zu verwenden [ZLOCKI 2017]. Datenbanken erlauben es eine Menge an Daten strukturiert und effizient zu speichern. Auch in der vorliegenden Arbeit soll eine Datenbank dazu verwendet werden, die Beschreibungen der Fahrsituationen aus dem urbanen Testgebiet zu speichern. Ausführungen zu dem in dieser Arbeit gewählten Ansatz und Datenbankmodell finden sich in Kapitel 3.

2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Fahren im urbanen Verkehr ist eine komplexe Aufgabe. Soll diese Aufgabe in zukünftigen Fahrzeugen von einem technischen System übernommen werden, müssen die Situationen verstanden werden und adäquate Verhalten gefunden werden. In diesem Kapitel wurden die Begriffe der Situationsbeschreibung voneinander abgegrenzt und verschiedene Beschreibungsformen und Klassifikationsmethoden aufgezeigt. Eine Standardmethode zur Beschreibung und Klassifikation existiert bisher nicht, insbesondere da die relevanten Komponenten von der jeweiligen Fragestellung abhängig sind.

Das Fahrverhalten anderer Verkehrsteilnehmer in allen Situationen zu verstehen und eigene Handlungen zu planen ist insbesondere in der komplexen urbanen Umgebung keine triviale Aufgabe. Zwar existieren rechtsbindende Normen, die von allen Fahrern eingehalten werden müssen, jedoch kann durch die Regeln nicht jeder Situation ein eindeutiges Sollverhalten zugeordnet werden. Die Analyse der deutschen Straßenverkehrsordnung zeigt, dass es in vielen Situationen ein sehr gutes Verständnis der Intentionen Anderer bedarf. Menschliche Fahrer

müssen das korrekte Verhalten in den verschiedenen Fahrsituationen erst erlernen. Das geschieht über eine Fahrschul Ausbildung die mit einer Prüfung abgeschlossen wird. Der Fahrschüler muss dabei die Fähigkeit nachweisen, ein Fahrzeug sicher im Verkehr führen zu können. Da nicht alle Situationen in solch einer Fahrprüfung geprüft werden können, wird mit einer theoretischen Prüfung dafür gesorgt, dass den Fahrschülern auch das korrekte Verhalten in besonderen, evtl. in der Fahrschul Ausbildung nicht real erlebten, Situationen bekannt ist.

Trotz der Fahrausbildung und des erlernten Wissens, gibt es durch das Fehlverhalten menschlicher Fahrer viele Unfälle und gefährliche Situationen im Straßenverkehr. Das automatisierte Fahren soll einen Beitrag dazu leisten, den Verkehr sicherer zu machen. Es sollten also besonders solche Situationen in der Entwicklung des automatisierten Fahrens priorisiert werden, die das Risiko eines Unfalls durch menschliches Fehlverhalten bergen. Auch für Verkehrsunfallsituationen gibt es verschieden detaillierte Beschreibungsformen, die in Statistiken verwendet werden und für die Analyse von kritischen Fahrsituationen herangezogen werden. Für diese Arbeit sind insbesondere die Konflikte, die in einer Situation bestehen, interessant. Es existieren bereits systematische Einteilungen solcher Konflikte, die vor allem in der Unfallforschung von Versicherungen oder Automobilherstellern verwendet werden.

Automatisiertes Fahren ist ein Oberbegriff für die unterschiedlichen Stufen der Automatisierung von Kraftfahrzeugen. Mit der Stufe des vollautomatisierten Fahrens, die in dieser Arbeit betrachtet wird, muss das Fahrzeug sowohl die Umgebungserfassung, als auch die Durchführung der Bahnplanung und Fahrzeugführung übernehmen. Ein Fahrer steht dabei nicht mehr als Rückfallebene zur Verfügung. Der aktuelle Stand der Entwicklung des automatisierten Fahrens zeigt, dass noch kein Kraftfahrzeug dieser Stufe der Automatisierung existiert, welches ohne Fehler und mit gesetzlicher Zulassung auf öffentlichen Straßen in Deutschland fahren darf. Insbesondere der Aspekt der gesetzlichen Zulassung der Fahrzeuge für den öffentlichen Straßenverkehr ist noch Gegenstand aktueller Forschungen, da es auf diesem Gebiet noch keine eindeutig geregelten Prozesse gibt. In Pilotprojekten wurden für den Genehmigungsprozess Beschreibungen der Anwendungsfälle und der jeweiligen Sollverhalten und Rückfallebenen verwendet. Hierfür könnten ebenfalls die zuvor erwähnten Situationsbeschreibungen verwendet werden. Die steigende Fahrzeugautomatisierung, die eine zunehmende Anzahl verschiedener Fahrsituationen adressiert, kann jedoch zu einer nicht mehr handhabbaren Menge an zu definierenden Anwendungsfällen führen.

Aus der betrachteten Literatur kann geschlussfolgert werden, dass es in der Entwicklung, Erprobung und Zulassung automatisierter Fahrzeuge für den urbanen Verkehr sinnvoll und teilweise notwendig ist, die konkreten Anwendungsfälle des Systems genau zu definieren und abzugrenzen. Dafür ist eine einheitliche Beschreibungsform für urbane Fahrsituationen sinnvoll, die bisher jedoch fehlt. Die in der Literatur verwendeten Methoden und Komponenten liefern aber bereits einige Anhaltspunkte dafür. Dem automatisierten Fahrzeug soll eine strukturierte Wissensbasis zur Verfügung gestellt werden, auf Basis derer Entscheidungen auf taktischer Ebene getroffen werden können. Die vorliegende Arbeit widmet sich dieser Aufgabe.

Das folgende Kapitel 3 führt eine entsprechende Beschreibungsform für die Fragestellungen dieser Arbeit ein. Das bedeutet, dass insbesondere auch die Verkehrsregeln und Konflikte mit der gleichen Beschreibungsform darstellbar sein sollen.

Um die Priorisierung der Entwicklung von Fahrfunktionen des automatisierten Fahrens zu unterstützen, sind Betrachtungen von Verkehrsunfallsituationen besonders interessant. Insbesondere Konflikte zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern sollen daher in der Situationsanalyse berücksichtigt werden. Beschreibungen von konkreten Konflikt- und Unfallsituationen sollen daher ebenfalls in die Wissensbasis integriert werden.

Das in der Arbeit entwickelte Verfahren soll sowohl für die Priorisierung, die Entwicklung, als auch im Zulassungsprozess für vollautomatisierte Fahrzeuge im städtischen Verkehr, wo nicht alle möglichen Situationen getestet werden können, anwendbar sein. Auch dafür bestätigt die Literaturrecherche Bedarf an Methoden zum effizienten Testen von Funktionalitäten in einzelnen relevanten Situationen. Relevante Situationen sind nicht nur aus Konflikten, sondern auch aus den Fragen des theoretischen Führerscheintests ableitbar. Da Menschen auf diese Art nachweisen können, dass sie in den gefragten Situationen angemessen und regelkonform reagieren können, könnte dies auch eine anwendbare Methodik für automatisierte Fahrzeuge sein. Wenn auf der Fahrstrategieebene, wo Entscheidungen über Manöver getroffen werden, die korrekten Aspekte betrachtet wurden und die entsprechenden einzuhaltenden Regeln identifiziert werden können, könnte auch ein automatisiertes Fahrzeug auf dieser Ebene eine Art Führerscheintest bestehen.

Das folgende Kapitel 3 führt eine Beschreibungsform für urbane Fahrsituationen ein, in der die genannten Aspekte berücksichtigt werden. Es wird insbesondere darauf eingegangen, welche Komponenten benötigt werden, um die Situationen differenziert darzustellen. Fokus der Situationsanalyse ist die taktische Ebene des Fahrens, was es ermöglicht, einige Aspekte zu abstrahieren. Ziel ist es, eine Situation so zu beschreiben, dass auch die geltenden Verkehrsregeln und Konflikte in der Situation identifizierbar sind, die den Fahrsituationen im darauffolgenden Schritt (Kapitel 4) zugeordnet werden sollen.

3. Beschreibungsform für urbane Fahrsituationen

Um einer Fahrsituation entsprechende Verkehrsregeln und Konfliktsituationen zuordnen zu können, ist es nötig, die Situationen jeweils auf gleiche Art und Weise zu beschreiben. Nur wenn die gleiche Semantik verwendet wird, um Merkmale einer Situation zu beschreiben, kann darauf geschlossen werden, ob es sich in zu vergleichenden Situationen um die gleichen Eigenschaften handelt. Daher wurde eine Beschreibungsform zur strukturierten und einheitlichen Beschreibung von Fahrsituationen entwickelt. Eine Datenbank erlaubt das effiziente Speichern und Suchen einzelner Merkmale einer Situation. Die Beschreibungsform soll es ermöglichen, alle drei in der Arbeit verwendeten Datentypen zu beschreiben, sodass diese untereinander in Verbindung gesetzt werden können. Als Grundlage für die Verkehrsregeln wird der offizielle Fragenkatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung herangezogen. Für die Beschreibung von Konflikt- und Unfallsituationen im Verkehr dient der Unfalltypenkatalog des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) sowie reale Unfälle aus dem Münchener Stadtgebiet, die von der Polizei innerhalb von fünf Jahren erfasst wurden und innerhalb dieser Arbeit mit Hilfe der narrativen Beschreibungen in das Format des GDV überführt wurden. Zusätzlich sollen im Realverkehr aus einem Pkw erfasste zufällige Fahrsituationen als Testdatensatz für die Überprüfung des Konzeptes der Zuordnung der korrekten Verkehrsregeln und Gefahrensituationen dienen. Hierfür wurden Befahrungen im Gebiet München und Umgebung mit einem Fahrzeug durchgeführt und dabei Positions- und Videodate aufgezeichnet.

Ziel ist es, Fahrsituationen jeweils auf gleiche Art und Weise zu beschreiben, sodass für eine Beschreibung realer Situationen jeweils potenziell resultierende Unfallsituationen sowie in der Situation geltende Verkehrsregeln gefunden werden können. Im Folgenden werden die Komponenten vorgestellt, die Teil der Situationsbeschreibung sind. Zusätzlich wird darauf eingegangen, welche Informationen für die Beschreibung welcher der Datenquellen von Bedeutung sind. Auch auf die Struktur der Datenbank wird in diesem Kapitel näher eingegangen.

3.1 Elemente der Situationsbeschreibung

Die relationale Datenbank besteht aus Tabellen zur Beschreibung der einzelnen Komponenten einer Fahr- oder Konfliktsituation. Diese umfassen allgemeine Informationen zur Situation, Informationen zur Infrastruktur sowie die statischen und dynamischen Objekte in der Situation. In den allgemeinen Informationen wird jeder Situation eine eindeutige Identifikationsnummer zugewiesen. Außerdem können hier Informationen zur Verortung der Situation, zu zugehörigen Sensorinformationen oder anderen allgemeinen Attributen, die nicht zu den Objekten oder der Infrastruktur gehören, gespeichert werden. Das können beispielsweise Informationen zu den Witterungsbedingungen oder der Fahrbahnzustand sein. Auch der Verkehrszustand in der Situation gehört zu den allgemeinen Informationen.

Die Beschreibung der Infrastruktur beinhaltet den Typ der Infrastruktur sowie ggf. nähere Informationen zu Fahrstreifen und deren Abtrennungen (Markierungen) und möglichen Nutzungen. Auch nicht befahrbare Bereiche wie Grünstreifen und Fußgängerwege können hier berücksichtigt werden.

Objekte in der Situation können statisch oder dynamisch sein. Typ und Position der Objekte sowie ggf. deren Bewegungen, welche das Manöver und die Relation des Objekt-Manövers zum Manöver des Ego-Fahrzeugs angeben, werden in der Objekttablelle beschrieben. Das Ego-Fahrzeug ist ebenfalls ein Objekt innerhalb der Objekttablelle. Die Beschreibung des Ego-Fahrzeugs setzt sich neben der Position und Ausrichtung aus dem geplanten und aktuellen Manöver sowie der aktuellen und der geplanten Geschwindigkeit zusammen. Da es sich um Situationsbeschreibungen handelt, welche auf der Fahrstrategieebene verwendet werden, sind Angaben wie die Geschwindigkeit jedoch nicht in genauen Werten nötig, sondern grobe Abstufungen ausreichend, um zu erkennen, ob die Geschwindigkeit beibehalten oder in eine Richtung verändert wird. Statische Objekte können beispielsweise Verkehrszeichen oder Straßeneinrichtungen sein.

Jedes vorhandene Objekt kann außerdem nach Relevanz klassifiziert werden. Hierbei bedeutet relevant, dass das Objekt das Verhalten des Ego-Fahrzeugs direkt beeinflusst. Das ist der Fall, wenn das Ego-Fahrzeug das Manöver oder die Geschwindigkeit auf Grund des anderen Objektes ändert. Dieses Attribut ist insbesondere bei den Verkehrsregeln interessant und wird im entsprechenden Abschnitt 3.2 näher erläutert. Für jedes Objekt können außerdem weitere Attribute, wie das Anzeigen eines Richtungswechsels (Blinken bzw. Arm ausstrecken) oder andere Signale (Lichthupe oder Warnblinker) gespeichert werden. Eine Übersicht der Komponenten der Situationsbeschreibung ist in Abbildung 3.1 dargestellt, Anhang 1 enthält den Aufbau der Tabellen. Auf einige Komponenten wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

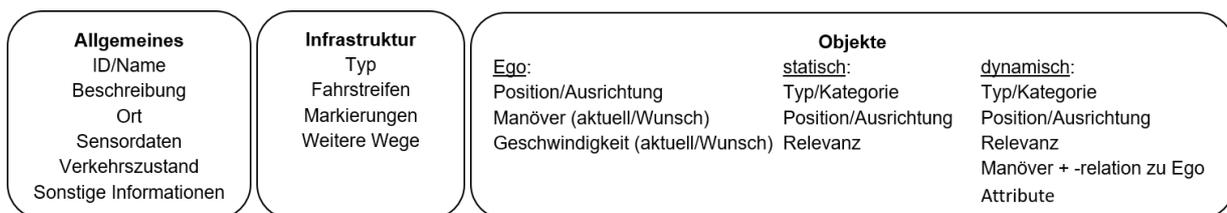


Abbildung 3.1: Bestandteile der Situationsbeschreibung innerhalb der Datenbank

Als Grundlage der Situationen des Realverkehrs dienen real erfasste Situationen aus dem Gebiet München und Umgebung. Die Erfassung erfolgte während mehrerer Fahrten mit einem Pkw mittels Videoaufzeichnung. Neben den Videos wurden auch GPS-Daten der Fahrten aufgezeichnet. Innerhalb einer Datenbank werden die Fahrsituationen, in die das Ego-Fahrzeug während der Testfahrten gekommen ist, beschrieben. Somit können im Nachhinein bestimmte Situationen aus der Gesamtheit der aufgezeichneten Situationen herausgefiltert und analysiert werden. Auch eine Klassifikation von Situationen wird durch die eindeutige Beschreibungsform ermöglicht.

Eine Schwierigkeit beim Beschreiben der Fahrsituationen ist die Definition einer Situation selbst. Hierbei wird die Regel angewandt, dass immer dann eine neue Situation anfängt, wenn

- a) sich der Infrastrukturtyp ändert (beispielsweise, wenn das Fahrzeug zunächst auf einem Streckenabschnitt fährt und dann an einen Knotenpunkt kommt),
- b) sich das Ego-Manöver verändert (beispielsweise, wenn zunächst geradeaus gefahren wird und dann ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt wird) oder
- c) ein neues Objekt in der Szene erscheint.

Da die Fahrsituationen mit denen aus dem Unfalltypenkatalog bzw. dem Fragenkatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung in Verbindung gesetzt werden sollen, kann der Detailgrad der Beschreibungen grob gehalten werden. Die Detaillierung einiger, der in Kapitel 2.1.2 erwähnten Beschreibungen, ist für diese Betrachtung von zu tiefer Detaillierung. Das bedeutet, dass beispielsweise zwar wichtig ist, wo sich Objekte in der Szene befinden, dies jedoch nicht unbedingt eine Genauigkeit von Metern haben muss, sondern in Relation zum Ego-Fahrzeug dargestellt sein soll. Da auch in den Verkehrsregeln und Unfalltypen nur Beziehungen zwischen Objekten beschrieben werden und mit Hilfe der Beschreibungen für eine Fahrsituation extrahiert werden soll, welche Regeln gelten und welche Unfälle entstehen könnten, sind nur diese Beziehungen unter den einzelnen Objekten der Szene und teilweise einzelne Elemente der Infrastruktur relevant. Auf die Relation von Fahrmanövern wird im Folgenden genauer eingegangen.

3.1.1 Relation von Fahrmanövern

Zwischen Objekten, die in einer Szene auftreten, bestehen Relationen, die innerhalb der Datenbankstruktur beschrieben werden können. Insbesondere durch die Manöver, die die Verkehrsteilnehmer ausführen, können Konflikte in der Situation entstehen, wenn sich zwei Verkehrsteilnehmer auf Kollisionskurs befinden. So sind einige Relationen von Fahrmanövern als kritischer zu bewerten als andere. Auf Basis einer Liste der möglichen Manöver, die die Verkehrsteilnehmer ausführen können und der Kombination aus Positionen, welche das betrachtete Objekt in Relation zum Ego-Fahrzeug einnehmen kann, ergibt sich die Gesamtzahl möglicher Manöverrelationen. Die Tabelle 3.1 beinhaltet die Attribute und die möglichen Ausprägungen dieser, welche bei der Beschreibung von Manöverrelationen berücksichtigt werden.

Tabelle 3.1: Attribute und mögliche Ausprägungen zur Beschreibung der Manöverrelationen

Attribute	Ausprägungen
Ego: Manöver	Geradeaus/rückwärts
	Abbiegen (nach rechts/links)
	Fahrstreifenwechsel (nach rechts/links)
	Ausscheren (nach rechts/links)

Objekt: Manöver	Geradeaus
	Abbiegen (nach rechts/links)
	Fahrstreifenwechsel (nach rechts/links)
	Ausscheren (nach rechts/links)
Objekt: Position lateral relativ zu Ego-Fahrzeug	rechts von Ego-Fahrzeug
	links von Ego-Fahrzeug
	gleiche laterale Position wie Ego-Fahrzeug
Objekt: Position longitudinal relativ zu Ego-Fahrzeug	vor Ego-Fahrzeug
	hinter Ego-Fahrzeug
	gleiche longitudinale Position wie Ego-Fzg.
Objekt: Orientierung relativ zu Ego-Fahrzeug	parallel zum Ego-Fahrzeug
	orthogonal zum Ego-Fahrzeug
Objekt: Ausrichtung relativ zu Ego-Fahrzeug	wie Ego-Fahrzeug
	entgegen Ego-Fahrzeug
	nach links aus Ego-Fahrzeugperspektive
	nach rechts aus Ego-Fahrzeugperspektive

Die Manöver Fahrstreifenwechsel und Ausscheren haben die gleichen Formen, unterscheiden sich jedoch dadurch, dass der Querversatz bei einem Fahrstreifenwechselmanöver größer ist. Das Ausscheren wurde deshalb als mögliches Manöver für die Objekte in einer Szene hinzugefügt, weil so auch kleinere Bewegungen innerhalb eines Fahrstreifens, wie beispielsweise beim Überholen von Radfahrern, beschrieben werden können. Bei den Manöverrelationen können die beiden Manöverarten jedoch zusammengefasst werden.

Des Weiteren gibt es für das Ego-Fahrzeug das Manöver rückwärts, welches bei den Objekten fehlt. Dies ist dadurch begründet, dass dies mit Hilfe der anderen Attribute wie der Ausrichtung definiert werden kann. Die Kombination der möglichen Ausprägungen ergeben $6 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 4 = 2160$ Möglichkeiten, allerdings sind nicht alle Kombinationen tatsächlich möglich. So kann ein Fahrzeug, welches orthogonal zum Ego-Fahrzeug orientiert ist nicht gleichzeitig die gleiche Ausrichtung haben wie das Ego-Fahrzeug. Die beiden letzten Attribute müssen also kombiniert werden und ergeben gemeinsam vier verschiedene Kombinationen (parallel

mit Ausrichtung wie Ego oder entgegen Ego und orthogonal nach links oder rechts). Ebenso gilt für die Positionen des Objektes, dass die Kombination ‚gleiche laterale Position wie Ego‘ und ‚gleiche longitudinale Position wie Ego‘ gleichzeitig nicht möglich ist, denn dann befände sich das Objekt an derselben Position wie das Ego-Fahrzeug. Es gibt lediglich acht Positionen die aus der Kombination dieser Angaben möglich sind, nämlich rechts, links oder direkt vor dem Ego-Fahrzeug, rechts oder links neben dem Ego-Fahrzeug, sowie rechts, links oder direkt hinter dem Ego-Fahrzeug, wie in Abbildung 3.2 dargestellt.

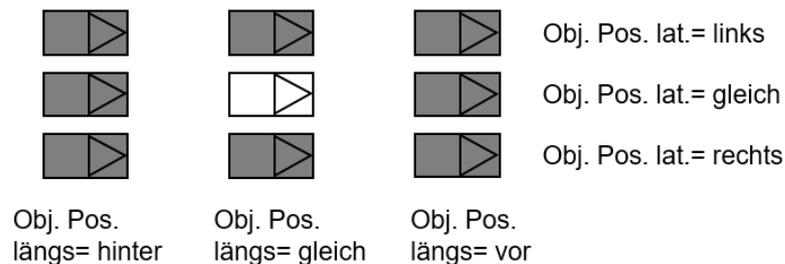


Abbildung 3.2: Mögliche Positionen von Objekten (grau) in Relation zum Ego-Fahrzeug (weiß)

Somit ergibt sich eine Gesamtanzahl von $6 \cdot 5 \cdot 8 \cdot 4 = 960$ möglichen Manöverrelationen. Teilweise sind Relationen in der Datenbank der Situationen nicht verwendet worden. Das liegt beispielsweise daran, dass Fahrzeuge in einem bestimmten Bereich des Fahrzeugs nicht beschrieben wurden. Biegt beispielsweise ein Fahrzeug hinter dem Ego-Fahrzeug rechts ab ist dies je nach Anwendungsfall häufig nicht relevant für die Fahrsituation. Eliminiert man alle Kombinationen mit Fahrzeugen hinter dem Ego-Fahrzeug, so entfallen drei mögliche Positionen des Objektes und damit 360 Manöverrelationen. Für die Beziehung zwischen zwei Verkehrsteilnehmern, die beide rechts abbiegen, ergeben sich somit beispielsweise die Möglichkeiten, die in der Abbildung 3.3 dargestellt sind.

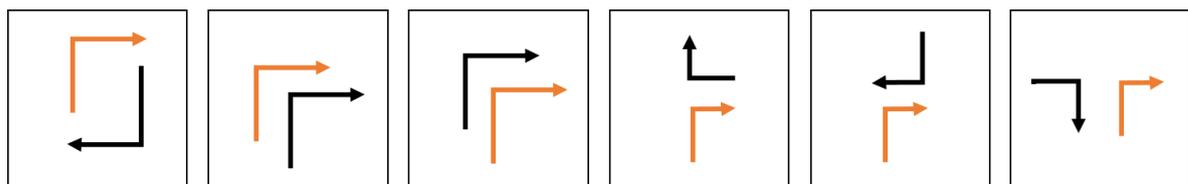


Abbildung 3.3: Manöverrelationen von zwei rechts abbiegenden Verkehrsteilnehmern

Eine Schwierigkeit bei der Zuordnung der Attribute besteht darin, festzulegen zu welchem Zeitpunkt die Attribute bestimmt werden. Werden Manöver mit Richtungsänderung wie das Abbiegen betrachtet, muss ein Punkt der Trajektorien gewählt werden, an dem die Attribute zugeordnet werden. Innerhalb dieser Arbeit wird der Startpunkt der Manöver dafür ausgewählt. Somit würde einem anderen Verkehrsteilnehmer, der sich in der Fahrsituation hinter dem Ego-Fahrzeug befindet und auch die Intention hat abzubiegen, zu diesem Zeitpunkt noch das Manöver Geradeausfahren zugeordnet werden. Die Beschreibungen wurden in Anlehnung an die Situationsbeschreibung im Unfalltypenkatalog und im Fragebogenkatalog zum theoretischen Führerscheintest entwickelt. Dabei sind zunächst nur die Konstellationen zwischen Objekten in der Umgebung des Fahrzeugs relevant. Für die Entscheidung für ein Manöver auf dieser

Basis, sind auch dynamische Eigenschaften relevant, die allerdings erst in einem späteren Schritt (vgl. Kapitel 5) berücksichtigt werden.

3.1.2 Darstellung und Beschreibung der Infrastruktur

Die infrastrukturellen Komponenten einer Szene stellen vor allem den befahrbaren Straßenraum und die angrenzenden Flächen dar. Dabei ist einerseits bedeutsam, ob sich das Fahrzeug auf einem Streckenabschnitt oder an einem Knotenpunkt befindet, andererseits aber auch genauere Eigenschaften der Infrastruktur. Insbesondere in Bezug auf die Verkehrsregeln ist es häufig relevant, dass es beispielsweise Besonderheiten an Kreuzungen oder Kreisverkehren zu beachten gilt. Die Zuordnung der Infrastruktur zu einer Kategorie Knotenpunkt, Einmündung, Kreisverkehr oder Strecke kann anhand von Kartendaten ermittelt werden, da die GPS-Positionen der einzelnen Situationen bekannt sind. Diese Typisierung wird als ein Wert in der Beschreibung gespeichert. In der Infrastrukturbeschreibung wird dies konkretisiert, indem Fahrstreifen und deren Nutzungen, sowie Markierungen hinzugefügt werden.

Die folgende Abbildung 3.4 zeigt schematisch auf, wie Knotenpunkte abstrahiert dargestellt und erweitert werden. Einmündungen haben im Vergleich zu Knotenpunkten nur drei Zufahrten und Strecken entsprechend zwei. Bei Kreisverkehren wird jeweils nur eine Zufahrt sowie die Kreisfahrbahn in einer Situation beschrieben. Die Situation durchfahren eines Kreisverkehrs wird somit in die Einzelsituationen Einfahren in einen Kreisverkehr, Fahren in einem Kreisverkehr und Ausfahren aus dem Kreisverkehr unterteilt werden, je nachdem wie weit im Kreisverkehr gefahren wird.

Vom Mittelpunkt ausgehend werden die Zufahrten in die verschiedenen Richtungen beschrieben. Jeder Zufahrt werden Flächen zugewiesen, welche dann gewidmet werden können. Wie in Abbildung 3.4 dargestellt, beispielsweise als Fußgängerweg, Fahr- oder Grünstreifen. Zusätzlich können zwischen den Flächen Markierungen definiert werden. Das können beispielsweise durchgezogene oder gestrichelte Markierungen unterschiedlicher Farbgebung sein.

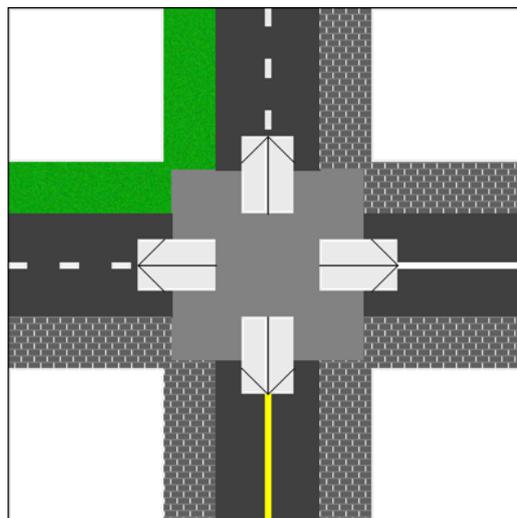


Abbildung 3.4: Beispielhafte Darstellung eines Knotenpunktes mit Informationen aus der Datenbank

Statische Objekte der Infrastruktur sowie weitere Markierungen, wie beispielsweise Zebrastreifen, können mittels der Objekte hinzugefügt werden. Werden die Infrastrukturteile aus Kartendaten wie Open Street Maps extrahiert, so können Eigenschaften der Straßen, wie die Vorfahrtsregelungen oder Geschwindigkeitsbegrenzungen, ebenfalls extrahiert und gespeichert werden. Da das Ziel der Arbeit die Betrachtung von Fahrsituationen ist, die auf einer taktischen Entscheidungsebene verwendet werden kann, werden einige Details der Situation von der Betrachtung ausgeschlossen. Die Beschreibungsform wurde in Anlehnung an die Beschreibungen von Konfliktsituationen und Beispielsituationen aus dem Fragebogenkatalog zum theoretischen Führerscheintest (vgl. folgende Kapitel) entwickelt, da daraus entsprechende Verkehrsregeln und Konflikte extrahiert werden sollen. Die dafür relevanten Informationen beziehen sich insbesondere auf zuvor genannten Merkmale. Einflüsse wie Fahrbahneigenschaften oder Witterungsbedingungen werden nicht weiter betrachtet, da sie vor allem eine Anpassung in der Stabilisierungsebene bedürfen, die in dieser Arbeit nicht betrachtet wird.

3.2 Beschreibung von situationsspezifischen Verkehrs- und Verhaltensregeln

Ähnlich zu den aufgezeichneten Fahrsituationen, die innerhalb der Datenbankstruktur beschrieben und abgebildet werden können, können auch die Verkehrsregeln und die zu beachtenden Fahraufgaben von einzelnen Situationen beschrieben werden. Die Verordnung über die Zulassung von Personen zum Straßenverkehr (Fahrerlaubnis-Verordnung - FeV) schreibt vor, welche Voraussetzungen Personen, die ein Fahrzeug im Straßenverkehr führen wollen, erfüllen müssen [BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG 2010]. In der Fahrschüler-Ausbildungsverordnung [BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG 2012] ist festgeschrieben, zu welchen Themen die Anwärter auf einen Führerschein in der theoretischen Führerscheinprüfung geprüft werden müssen. Ebenso gibt es einen offiziellen Fragenkatalog, aus dem die Prüfungsfragen ausgewählt werden. Neben der Abfrage von beispielsweise Verkehrsschildern sowie ökologischem Fahren und weiteren Aspekten, werden in etlichen Fragen auch konkrete Fahrsituationen dargestellt und der Prüfling muss jeweils angeben, welches Verhalten für den Fahrer, aus dessen Sicht die Situation dargestellt ist, das korrekte ist.

Die Abbildung 3.5 zeigt eine Beispielfrage aus einem Fragebogen einer theoretischen Führerscheinprüfung. Es sind stets drei Antwortmöglichkeiten zur Fragestellung gegeben. In der Prüfung muss entschieden werden, wie viele und welche dieser Antworten korrekt sind. Durch die Anzahl der Punkte, die durch die korrekte Beantwortung einer Frage erreicht werden können, werden die Fragen unterschiedlich gewichtet. Es können pro Frage zwischen zwei und fünf Punkten erreicht werden. Vorfahrtsfragen haben beispielsweise die Wertigkeit fünf. Das fehlerhafte Beantworten von zwei solcher Fragen in der Prüfung führt zum Nichtbestehen der Prüfung, ansonsten sind maximal zehn Fehlerpunkte möglich. Abbildung 3.5 zeigt eine Frage zur Vorfahrtsregelung. Durch die korrekten Antworten kann das jeweilige Sollverhalten in der Situation identifiziert werden.

1 / 1	Grundfrage	Frage: 1.3.01-007-M	Punkte: 5
Welches Verhalten ist richtig?			
		<input checked="" type="checkbox"/> Ich muss den Radfahrer durchfahren lassen <input checked="" type="checkbox"/> Ich muss den Motorradfahrer durchfahren lassen <input type="checkbox"/> Ich darf vor dem Radfahrer abbiegen	

Abbildung 3.5: Beispiel einer Frage zum Thema Vorfahrt, Vorrang aus dem amtlichen Fragenkatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung [TÜV DEKRA ARGE TP 21 GBR 2020]

Der amtliche Fragenkatalog setzt sich für die Fahrerlaubnis der Klasse B (Pkw) aus Fragen der im Folgenden aufgeführten Kategorien zusammen. Fragen des Grundstoffs sind für alle Führerscheinkategorien gleich, Fragen des Zusatzstoffs sind je nach Kategorie des Führerscheins verschieden.

- Gefahrenlehre (181 Fragen Grundstoff + 148 Fragen Zusatzstoff)
- Verhalten im Straßenverkehr (225 Fragen Grundstoff + 180 Fragen Zusatzstoff)
- Vorfahrt, Vorrang (41 Fragen Grundstoff)
- Verkehrszeichen (136 Fragen Grundstoff + 26 Fragen Zusatzstoff)
- Umweltschutz (33 Fragen Grundstoff + 31 Fragen Zusatzstoff)
- Technik (2 Fragen Grundstoff + 98 Fragen Zusatzstoff)
- Eignung und Befähigung von Kraftfahrern (1 Frage Grundstoff + 5 Fragen Zusatzstoff)
- Vorschriften über den Betrieb von Fahrzeugen (21 Fragen Zusatzstoff)

Aus diesem Fragenkatalog für die Führerscheinklasse Pkw, die im Jahr 2019 aktuell waren, sind für die vorliegende Arbeit die Fragen der vier erstgenannten Kategorien interessant, da diese konkrete Fahrsituationen aufzeigen und das Sollverhalten eines Pkw-Fahrers auf Fahrstrategieebene beinhalten. Die Fragen wurden als Situationen in der Datenbank dargestellt. Ausgeschlossen wurden dabei allerdings solche Fragen, die sich beispielsweise auf menschliche Aspekte des Fahrverhaltens wie Müdigkeit oder Eingewöhnung in ein neues Fahrzeug beziehen oder Werte und Faustformeln abfragen, wie beispielsweise für zulässige Geschwindigkeiten bzw. die Berechnung von Bremswegen oder Ähnlichem. All solche Fragen, die nicht für den Kontext dieser Arbeit, in der ein automatisiert fahrendes Fahrzeug eine Entscheidung auf Fahrstrategieebene treffen soll, relevant sind oder die nicht konkret auf eine nächste Handlung hinweisen, wurden hier nicht betrachtet. Außerdem gibt es einige Fragen, die über dieselbe Situationsbeschreibung abgefragt werden können. Diese Fragen wurden zusammengefasst.

Innerhalb der Datenbankstruktur können diese Situationen mit den gleichen Attributen wie im Kapitel 3.1 aufgeführt, beschrieben werden. Auch die Beispielsituation aus dem Fragebogenkatalog aus Abbildung 3.5 ist so in die Beschreibungsform der Datenbank überführt worden. In Abbildung 3.6 ist diese Situation noch einmal und mit Hilfe der eigens dazu entwickelten grafischen Oberfläche abgebildet. Mit den Pfeilen in der Abbildung werden die Attribute aktuelle und zukünftige Geschwindigkeit dargestellt, die in der Datenbank gespeichert sind. So deutet der rote Pfeil an, dass das Fahrzeug fährt und der blaue, dass verzögert werden muss. Die Lösung der Fahraufgaben ist also in den Beschreibungen in der Datenbank jeweils enthalten. Auch die Pfeile in oranger Farbe, welche das aktuelle Manöver (hell) und das langfristige Manöver (dunkler) darstellen, zeigen die Planung des Fahrzeugs für die nächsten Zeitschritte an. Es werden also eindeutige Verhaltensregeln für ein Fahrzeug in der jeweiligen Situation identifiziert.

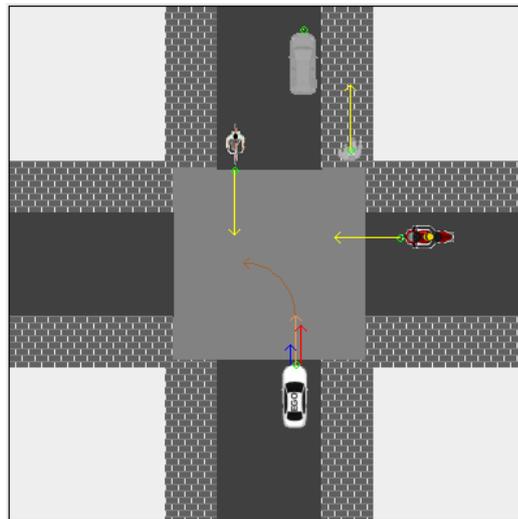


Abbildung 3.6: Abbildung der Frage 1.3.01-007-M als Bild aus der grafischen Benutzeroberfläche im Beschreibungsformat der Fahrsituationsdatenbank

Da in den Prüfungsfragen allerdings teilweise, wie auch im Beispiel aus Abbildung 3.5 zu sehen, mehrere Regeln abgefragt werden, werden diese in den Situationsbeschreibungen in der Datenbank getrennt voneinander gelistet. In dieser Fahrsituation ist beispielsweise zu beachten, dass sowohl dem Motorradfahrer als auch dem Radfahrer Vorfahrt gewährt werden muss. Auch wenn jeweils einer dieser beiden Verkehrsteilnehmer nicht in der Szene zu sehen wäre, müsste das Ego-Fahrzeug für das jeweils andere halten. Um die beiden Fälle später korrekt zuordnen zu können, wird die Situation in zwei Fahrsituationen aufgeteilt. Sollte sich ein automatisiert gesteuertes Fahrzeug in dieser Situation befinden, wäre zunächst nur relevant, dass auf dieser Rechts-vor-Links geregelten Kreuzung ein Fahrzeug rechts vorhanden ist. Da das Ego-Fahrzeug einem von rechts kommendem Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss, würde es im Normalfall nicht in die Interaktion mit dem Fahrrad geraten. Die Vorrangfrage ist trotz dessen in der Prüfungsaufgabe vorhanden und muss in anderen Situationen betrachtet werden. Sie ist also auch als Einzelfall relevant.

Für die Prüfungsfrage 1.3.01-007-M werden also zwei Regeln in der Datenbank dargestellt. Eine Situation beinhaltet das von rechts kommende Fahrzeug, eine andere Situation beinhaltet das entgegenkommende Fahrzeug. Die Lösung beider Situationen ist in der Antwort zur Frage dargestellt. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Art der Verkehrsteilnehmer, die in dieser Beispielsituation dargestellt sind nicht von Relevanz ist. Sollten sich an Stelle des Motorrads oder Fahrrades ein Pkw befinden, würde dieselbe Regel gelten. Dies wird in der Relevanzbeschreibung der beiden Objekte zu dieser Situation in der Datenbank festgehalten. Die Erläuterung des Relevanz-Attributes folgt in Abschnitt 3.2.1.

Mit Hilfe der in der Datenbank beschriebenen Fahrsituationen aus den Fragebögen sollte es möglich sein, alle Verkehrsregeln zu repräsentieren und sogar einige nicht explizit in den Verkehrsregeln behandelte Verhaltensnormen darzustellen. Es ist jeweils auch das korrekte Verhalten des Ego-Fahrzeugs abgebildet, womit jede der Situationen korrekt aufgelöst werden könnte. Wie auch in den meisten der Fragen sind die Situationen auf einem abstrakten Detailgrad beschrieben, wobei einzelne Informationen, zum Beispiel zur Dynamik der Fahrzeuge, im jeweiligen Szenario fehlen. Im Einzelfall wäre es also denkbar, dass ein anderes als das in der korrekten Antwort geforderte Verhalten gewählt werden muss. Solche Manöver, wie Gefahrenbremsungen oder Ausweichmanöver in Gefahrensituationen, werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Für solche Aktionen ist es insbesondere automatisierten Fahrzeugen meist möglich zu berechnen, welche Sicherheitsräume dem Fahrzeug zur Verfügung stehen oder ob eine Trajektorie kollisionsfrei ausgeführt werden kann. Die Fahrhinweise, die aus den in den Fragebögen geforderten Verhalten resultieren, geben also Information an die taktische Ebene des Fahrverhaltens, nicht jedoch an die operative Ebene. Situationen, die im Fragebogenkatalog fehlen, sind insbesondere solche, die über keine das Fahrzeug beeinflussenden Merkmale verfügen. In diesen Fällen kann das Fahrzeug also frei fahren, ohne auf Besonderheiten der Situation achten zu müssen.

3.2.1 Relevanz von Komponenten

Innerhalb der Beschreibung der Verhaltensregeln spielt es eine bedeutende Rolle, ob andere Verkehrsteilnehmer für das eigene Verhalten relevant sind oder nicht. Dies wird innerhalb der Beschreibungen der Regeln bzw. Testfragen daran festgemacht, ob das Ego-Fahrzeug a) das geplante Manöver oder b) die geplante Geschwindigkeit auf Grund des Objektes ändern muss. Das bedeutet, ein Objekt ist dann relevant für das Ego-Fahrzeug, wenn das Ego-Fahrzeug beispielsweise zunächst verzögern muss bevor es ein Manöver ausführt oder aber ein anderes Manöver ausführen muss als ursprünglich geplant. Das gilt beispielsweise für die meisten Fahrstreifenwechselmanöver oder Ausweichmanöver. Die Relevanz von Objekten muss im Entscheidungsprozess automatisierter Fahrzeuge betrachtet werden. Regelt ein automatisiertes Fahrzeug auf ein bestimmtes Objekt, wird dies häufig als Zielobjekt oder Target bezeichnet.

Die Auswahl des Zielobjektes erfolgt je nach Fahrfunktionen auf Basis gewisser Regeln. Bei einem ACC-System beispielsweise, ist ein Objekt dann ein Zielobjekt, wenn es sich direkt vor

dem Ego-Fahrzeug befindet und das Ego-Fahrzeug nicht die Wunschgeschwindigkeit realisieren kann, da der Abstand zum Vorderfahrzeug sonst den Mindestabstand unterschreiten würde. Die Manöverrelation kann also eine entschiedene Rolle spielen, wenn bestimmt werden soll, ob ein Objekt relevant ist. Durch die Zuordnung zu Verkehrsregeln kann aber auch durch diese festgelegt werden, welches der Objekte relevant ist. Auch um Anforderungen an die Sensorik automatisierter Fahrzeuge festlegen zu können, können die Regeln verwendet werden um zu bestimmen, welche Objekte definitiv erfasst werden müssen.

In den Fragen zur theoretischen Führerscheinprüfung sowie in den Verkehrsregeln der Straßenverkehrsordnung werden jeweils die Objekte genannt, welche für ein bestimmtes Verhalten oder eine erforderliche Reaktion eines Fahrers von Bedeutung sind. Insbesondere bei den Beschreibungen der Fragen aus den Prüfungskatalog ist ersichtlich, dass die Situationen jeweils nur Beispiele für Verkehrsregeln darstellen. In der Beschreibung dieser Situation soll jeweils ersichtlich werden, welche Komponenten von Relevanz sind, damit die entsprechende Regel angewandt wird. Dies kann nicht nur für die Komponenten als Ganzes gelten, sondern kann auch für einzelne Attribute von Komponenten bestimmt werden. So sind beispielsweise nicht unbedingt alle Attribute der Manöverrelation eines Objektes zum Ego Fahrzeug relevant, sondern nur eine der Positionsbeschreibungen. Dies kann in der Tabelle zu Relevanz-Einträgen nachvollzogen werden. Im in Abbildung 3.5 dargestellten Beispiel ist der Typ des Verkehrsteilnehmers beispielsweise nicht relevant, sondern nur dessen Position und Bewegungsrichtung. Dies kann in den komponentenspezifischen Relevanz-Attributen des Objektes gespeichert werden, sodass später auch Situationen, in denen ein Pkw oder anderes Fahrzeug vom rechten Knotenpunktarm aus Sicht des Ego-Fahrzeugs auf die Kreuzung zufährt, dieser Frage zugeordnet werden können.

3.3 Beschreibung von Verkehrsunfallsituationen

In der Datenbank sind neben den Tabellen zur Beschreibung der Fahrsituationen und Verkehrsregeln auch Tabellen zur Beschreibung von Unfalldaten integriert. Die Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen. Zum einen beinhaltet eine Tabelle die Kategorien der Unfallsbeschreibungen wie sie vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) in deren Unfalltypenkatalog verwendet werden. Zum anderen werden reale Unfalldaten aus einem Testgebiet in der Datenbank gespeichert.

Die Unfalltypen des GDV sind präziser beschrieben als die der Polizei. Hierbei werden neben den Informationen, die in den herkömmlichen Beschreibung zum Unfalltyp und der Unfallart (vgl. Kapitel 2.2.3) auch weitere Eigenschaften des Unfalls beschrieben. So wird unterschieden, welche Manöverrelation das Objekt zum Unfallfahrzeug hatte und auf welcher Position, relativ zum Unfallfahrzeug, sich das beteiligte Objekt befand. Außerdem werden teilweise weitere Informationen festgehalten, wie beispielsweise präzisere Informationen zur Infrastruktur oder die Vorfahrtsregelung. Diese Informationen können mit den Beschreibungen aus der Datenbank der Fahrsituationen verknüpft werden.

Im GDV Unfalltypenkatalog werden dieselben Unfalltypen verwendet wie in den offiziellen Statistiken der Polizei, allerdings werden diese weiter unterteilt. So ist beispielsweise der Unfalltyp 2 Abbiege-Unfall im Unfalltypenkatalog nochmals in neun weitere Gruppen gegliedert, wie beispielsweise Rechtsabbieger, Linksabbieger, zwei Abbieger sowie verschiedene Vorfahrtsregelungen. Innerhalb dieser Gruppen wird wiederum zwischen den jeweiligen Konstellationen zu den anderen beteiligten Objekten unterschieden. Es ergeben sich im Typ Abbiege-Unfall 37 konkrete Beispiele von Konflikten. Hinzu kommen zu jeder der neun Gruppen eine Kategorie, die den Fall beschreibt, dass die konkrete Konstellation in der Gruppe nicht klar ist, sowie auch ein Unfallcode für alle weiteren Unfälle dieses Typs, die nicht einem der definierten Gruppen zugeteilt werden kann. Somit wird der Typ Abbiege-Unfall in 47 verschiedene Unfallcodes unterschieden. Je nach Wissensstand zu dem Unfall, der passiert ist, kann einer dieser Codes konkret zugeordnet werden.

Die Abbildung 3.7 zeigt einen Ausschnitt aus dem Unfalltypenkatalog. Innerhalb des Unfalltyps Abbiege-Unfall werden mit dem Code 28 alle Abbiege-Unfälle bezeichnet, in der für den Abbieger ein Pfeil-Lichtzeichen galt. In diesem Fall gibt es darin wiederum sechs verschiedenen Varianten mit den Ziffern 281 bis 286. Zusätzlich wird mit der Nummer 289 der Fall kodiert, wenn nicht festgestellt werden konnte, um welche Art Verkehrsteilnehmer es sich handelte, mit dem der Abbieger in Konflikt stand.

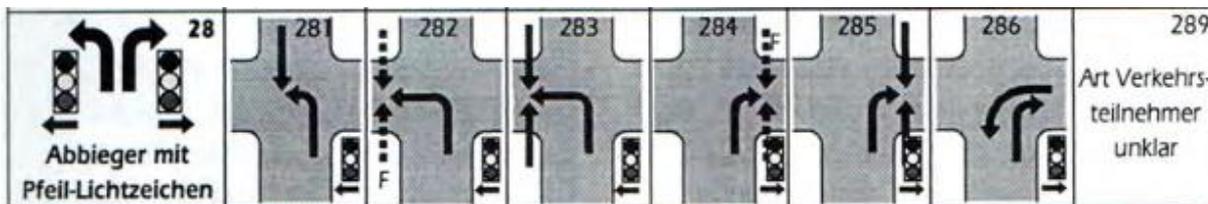


Abbildung 3.7: Ausschnitt aus dem Unfalltypenkatalog des GDV des Typs Abbiege-Unfall [GDV UNFALLFORSCHUNG DER VERSICHERER 2016]

In die Datenbank wird eine Tabelle mit Informationen zu den Unfalltypen integriert, in der die Beschreibungen in der Semantik, wie sie auch für die Fahrsituationen verwendet wurden, übernommen werden. So wird das Fahrzeug, welches im Unfalltypenkatalog als Verursacher gilt, als Ego-Fahrzeug bezeichnet, andere Verkehrsteilnehmer entsprechen den Objekten und können mit Eigenschaften wie dem Typ des Objektes (z.B. Fußgänger, Pkw) sowie der Bewegung näher beschrieben werden. Mit Hilfe dieser Zuordnung kann auch die Manöverrelation bestimmt werden und der Unfalltyp kann einer Fahrsituation zugeordnet werden. Diese Analogie kann verwendet werden, wenn beispielsweise die Unfalltypen bekannt sind, die besonders häufig vorkommen oder besonders schwerwiegend sind und Fahrsituationen aufgefunden werden sollen, welche ähnliche Konstellationen und Verkehrsteilnehmer beinhalten, die also potenziell zu dem betrachteten Unfalltyp führen könnten.

Abgesehen von den Einteilungen des Unfalltypenkatalogs des GDV werden auch reale Unfälle in der Datenbank der Fahrsituationen beschrieben. Hierbei handelt es sich um Unfälle aus dem Gebiet des Münchner Nordens in dem auch Befahrungen stattgefunden haben und dem-

entsprechend Fahrsituationen in der Datenbank vorhanden sind. Bei diesen ist die geographische Verortung von besonderem Interesse, da somit auf Unfallschwerpunkte im Untersuchungsgebiet geschlossen werden kann und ähnliche Fahrsituationen an diesen Orten gefunden werden können. Auch diesen Fahrsituationen kann ein Typ nach Unfalltypen-Katalog des GDV zugeteilt werden, wenn aus den Beschreibungen zum Unfallhergang erkannt werden kann, wie die konkrete Konstellation der Verkehrsteilnehmer bei dem Unfall war. Des Weiteren werden alle Attribute, die bei der Unfallaufnahme eines konkreten Unfalls von der Polizei aufgenommen werden, in einer separaten Datenbanktabelle zu den Unfällen gespeichert. Dieser Datensatz umfasst 5509 Einträge von drei Straßen des Untersuchungsgebietes München Nord und beinhaltet alle von der Polizei aufgenommenen Unfälle aus den Jahren 2012 bis 2017. Da es auch Beschreibungen zu den Unfallhergängen in den Datensätzen gibt, konnten bei 1751 der Unfälle die genaue Konstellation der Fahrsituation ermittelt werden und so wiederum den Unfalltypen des Kataloges der GDV zugeordnet werden. Detaillierte Auswertungen zu den Unfällen im Untersuchungsgebiet werden im Kapitel 4.1.1 näher beschrieben.

3.4 Struktur der Datenbank und grafische Benutzeroberfläche

Datenbanken erlauben es, eine Menge an Daten strukturiert und effizient zu speichern. Das Datenbankmodell definiert dabei, welche Art von Daten gespeichert werden kann. Die meist verwendete Art ist die relationale Datenbank, welche Tabellen enthält, die untereinander in Beziehungen stehen. Mit der Hilfe von Schlüssel, wie Identifikationsnummern (IDs) oder Namen, werden die Verbindungen zwischen den Tabellen hergestellt. Auf die gespeicherten Daten wird durch das sogenannte Datenbank Management System zugegriffen. Für relationale Datenbanken ist die meist genutzte Datenbanksprache für das Abrufen und Bearbeiten der Daten die Structured Query Language, zu Deutsch „strukturierte Abfrage-Sprache“, abgekürzt SQL. [DATE 2004]

Auch die Fahr- und Unfallsituationen sollen strukturiert gespeichert werden und die Beschreibungen zu einzelnen Attributen, wie beispielsweise den zuvor beschriebenen Manöverrelationen, sollen wiederverwendbar sein. Es bietet sich an, die einzelnen Situationen in Tabellen zu speichern und ebenfalls Tabellen für solche Attribute zu definieren, die in jeder Beschreibung einer Fahr- oder Unfallsituation Verwendung finden können. In den Fahrsituations- und Unfalltypenbeschreibungen kann dann auf den entsprechenden Schlüssel, in diesem Fall die ID, in der zugehörigen Tabelle verwiesen werden.

Abbildung 3.8 zeigt die Struktur der Datenbank. Die in der Abbildung blau hinterlegten Tabellen sind die Haupttabellen, welche die Fahrsituationen, die Unfallbeschreibungen und die Verkehrsregeln (bzw. Situationen aus dem Fragenkatalog, welche als Beschreibung der Verkehrsregeln herangezogen werden) beinhalten. In weiß hinterlegt werden die Tabellen dargestellt, welche als Hilfstabellen verwendet werden und einzelne Attribute der Situationsbeschreibung beinhalten, die wiederverwendbar sein sollen. Die Tabelle zur Infrastruktur beispielsweise ent-

hält verschiedene Kreuzungen, Einmündungen, Streckenabschnitte oder Kreisverkehre mit ihren Beschreibungen wie in Kapitel 3.1.2 erläutert. Jeder einzelnen darin gespeicherten Infrastruktur wird als Primärschlüssel eine eindeutige ID zugewiesen. In der Beschreibung der Situationen wird dann jeweils nur die passende ID aus der Tabelle der Infrastrukturen gespeichert. Ebenso wird mit den anderen Hilfstabellen verfahren. Die Objekttabelle enthält alle statischen und dynamischen Objekte mit deren Eigenschaften. Auch die Manöverrelationen und die Sensordaten wie Befahrungsvideos werden in eigenen Tabellen beschrieben, auf die dann innerhalb der Tabellen zu den Situationen verwiesen werden kann.

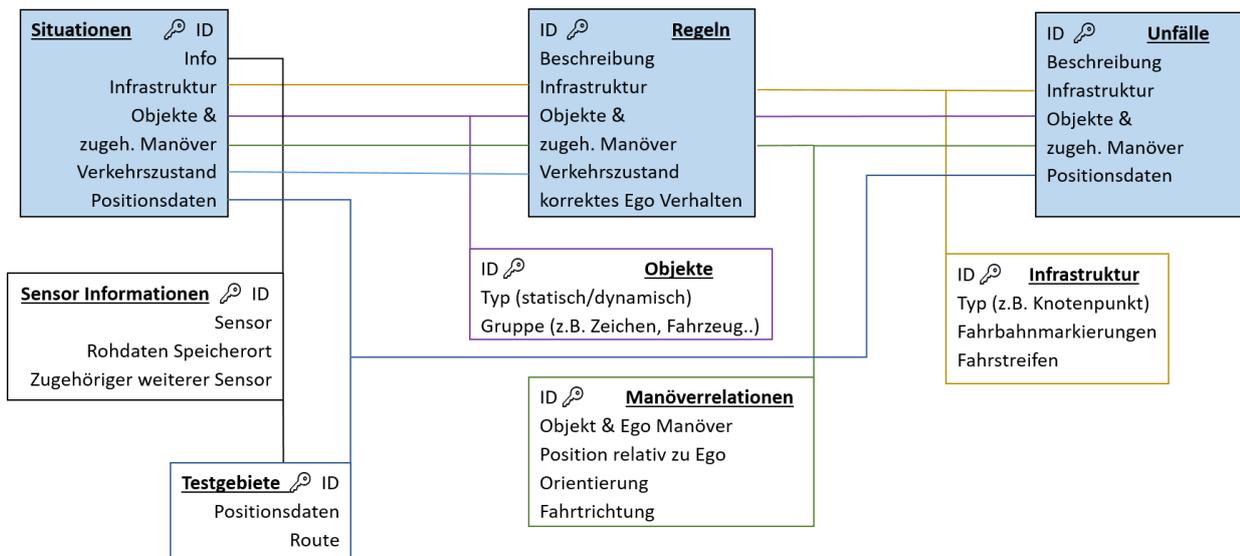


Abbildung 3.8: Struktur der Situationsdatenbank (eigene Darstellung)

Mit diesen Informationen kann die Datenbank nach unterschiedlichsten Gesichtspunkten ausgewertet und durchsucht werden. Es ist möglich, durch Filtern der Datenbank nach allen Fahr- oder Unfallsituationen einer bestimmten Art zu suchen. Das Filtern kann nach allen Merkmalen geschehen, die in der Beschreibung vorhanden sind. So kann zu Beispiel nach Situationen gesucht werden, in denen ein gewisses Manöver ausgeführt wurde oder die an einem bestimmten Ort stattgefunden haben. Da die Befahrungen in definierten Testgebieten stattgefunden haben, wurden auch die Namen der jeweiligen Routen mit in die Beschreibung aufgenommen. Dies ermöglicht eine Auswertung je nach Teststrecke. Durch Verkettung mehrerer Filter können nun beispielsweise Arten von Situationen gefunden werden, die in einer der Routen vorhanden sind, auf einer anderen jedoch nicht. Das ermöglicht zum Beispiel die Auswahl von Teststrecken für automatisiertes Fahren.

Für das Befüllen und das Filtern der Datenbank wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) gestaltet, die eindeutige Eingabemöglichkeiten vorgibt. Damit sollen subjektive Beschreibungen einer Situation weitestgehend vermieden werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit über Kommentare weitere Informationen, die ggf. nicht in der Standardbeschreibung vorhanden sind, zur Beschreibung der Situation hinzuzufügen. Außerdem werden durch das Programm automatisch Bilder zu den Situationen generiert, was das Befüllen und Durchsuchen der Fahr-

und Unfallsituationen vereinfacht. Auch für das Filtern der Datenbank können innerhalb der GUI gewünschte Eigenschaften ausgewählt und mit logischen Operatoren kombiniert werden, ohne, dass Kenntnisse über die Variablennamen innerhalb der Datenbank nötig sind. Die Umwandlung in die entsprechenden SQL-Befehle erfolgt innerhalb des Programms. Abbildung 3.9 zeigt die grafische Oberfläche.

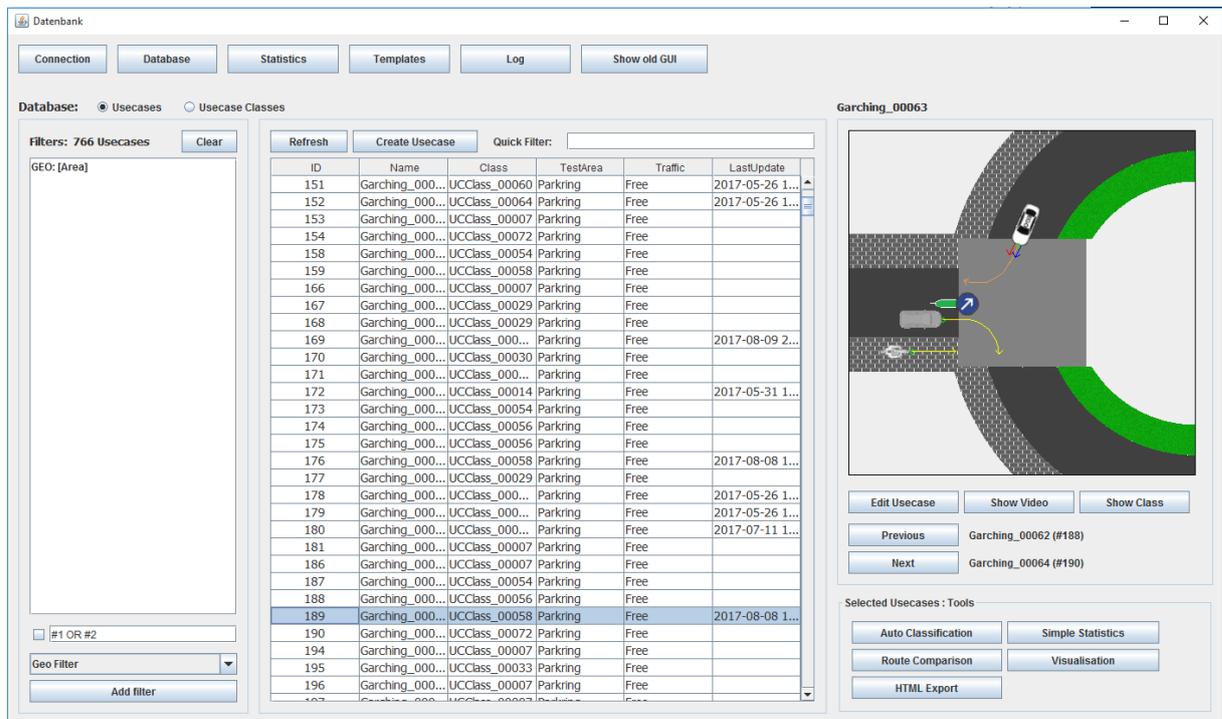


Abbildung 3.9: Grafische Oberfläche zum Erstellen, Filtern und Analysieren von Fahrsituationen der Datenbank (eigene Darstellung)

Auch statistische Auswertemöglichkeiten wurden in die GUI integriert. Ein Beispiel dafür ist das Auswerten und Vergleichen von bestimmten Testgebieten. Des Weiteren ist es möglich, relative Statistiken zu erzeugen. So können im ersten Schritt Situationen über die Filterfunktion der Datenbank extrahiert werden und diese innerhalb der statistischen Auswertung noch weiter gefiltert werden.

3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Dieses Kapitel befasste sich mit der Entwicklung einer umfassenden und einheitlichen Beschreibung von urbanen Fahrsituationen, wie eingangs in den Fragestellungen für die vorliegende Arbeit gefordert. Dazu wurde eine Semantik zur Beschreibung von urbanen Fahrsituationen entwickelt, die auf Beschreibungen von Unfalltypen und Fragen zu Verkehrsregeln basiert. Eine zugehörige grafische Benutzeroberfläche ermöglicht es, Fahrsituationen auf einfache Weise zu definieren und grafisch darzustellen. Weiterhin werden Möglichkeiten zur Auswertung von Fahrsituationen eingeführt, da das Beschreibungsformat in einer Datenbank gespeichert wird, welche einfach durch entsprechende Filter untersucht werden kann. Es wurden

Fahrsituationen von Fahrten im Realverkehr, Fahrsituationen aus dem Fragenkatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung sowie Fahrsituationen, die zu Unfällen führen, in die Datenbank aufgenommen.

Aus der Fragestellung der Arbeit ergab sich der Bedarf nach einer Beschreibungsform für Fahrsituationen, welche auf einem Detaillierungsgrad arbeitet, der ähnlich zu dem der Beschreibungen von Unfalltypen und Verkehrsregeln ist. Der Fokus liegt auf der Fahrstrategieebene der Fahrer, was bedeutet, dass die Objekte einer Szene definiert werden müssen und deren Zusammenhänge auf abstrakter Ebene wiedergegeben werden sollen. Die vorgestellte Beschreibungsform nutzt dafür eine bildliche Darstellung sowie Manöverrelationen von beweglichen Objekten. Insgesamt wurden über 2800 beispielhafte Fahrsituationen des Realverkehrs, über 200 Situationen, die die Fragen aus der theoretischen Führerscheinprüfung darstellen sowie fast 300 Unfalltypen des Unfalltypenkatalogs des GDV auf diese Art beschrieben.

Dadurch, dass insbesondere die Fahrstrategieebene adressiert wird, werden Situationen nicht detailgetreu abgebildet. Die Entscheidungen, die dann auf der nachfolgenden Bahnführungsebene getroffen werden, bedürfen zumeist detaillierterer Beschreibungen der Attribute einer Situation. Die operationelle Ebene des Fahrens wird somit nicht explizit adressiert, es ist jedoch denkbar, dass die Beschreibungsform bzw. Datenbank so erweitert wird, bzw. die Einträge so angepasst werden, dass sie auch den Anforderungen dieser Ebene gerecht werden. Das folgende Kapitel 4 beschreibt die Anwendung der Datenbank zur Analyse von Fahr- und Unfallsituationen eines Testgebietes beispielhaft.

4. Datenanalyse der Fahr- und Unfallsituationen im Testgebiet

In der Datenerhebung wurden einerseits Befahrungen in verschiedenen Testgebieten des Münchner Nordens und des Umlandes von München durchgeführt, weiterhin wurden Verkehrsunfalldaten der Münchener Polizei für die Straßen der Teststrecke des Münchener Nordens angefragt. Es liegen 7,2 Stunden Videomaterial von Befahrungen sowie 5509 Unfälle der Jahre 2012 bis 2017 vor. In diesem Kapitel werden die Datenquellen genauer analysiert. Voraussetzung dafür war die Überführung der Rohdaten in das zuvor definierte Format der Beschreibung von Fahrsituationen durch die Nutzung der Datenbankstruktur. In diesem Kapitel wird zunächst näher auf die Testrouten und die Befahrungsdaten aus dem Realverkehr eingegangen. Außerdem werden Verkehrsunfalldaten einer der Testrouten vorgestellt und analysiert. Im darauffolgenden Schritt wird eine Methodik vorgestellt, die es erlaubt die Fahrsituationen den Verkehrsregeln sowie den Konfliktsituationen aus dem Unfalltypenkatalog zuzuordnen. Diese Klassifikation geschieht mittels des sog. Data Matching, was für die Situationen der Teststrecken angewandt und ausgewertet wird.

4.1 Vorstellung der Testrouten

Eine der Routen, die als Untersuchungsroute ausgewählt wurde, liegt im Münchener Norden. Innerhalb der Befahrungen wurde die Strecke, welche aus drei Straßen besteht, die durch Knotenpunkte verbunden sind, mehrfach befahren. Innerhalb der Datenbank gibt es also eine Vielzahl an Situationen von dieser Route. Die Route ist in Abbildung 4.1 (links) dargestellt. Sie besteht aus drei Hauptverkehrsstraßen, bei denen die Fahrrichtungen baulich getrennt sind. Neben den drei großen Knotenpunkten, die die Straßen miteinander verbinden, gibt es eine Reihe weiterer signalisierter und nicht-signalisierter Knotenpunkte. Bei nicht-signalisierten Knotenpunkten sind die drei Straßen jeweils die Hauptverkehrsstraße. Jede der Straßen hat mehrere Fahrstreifen pro Fahrtrichtung.

Die Straßen der Untersuchungsroute gehören zum übergeordneten Straßennetz, ein Abschnitt führt durch einen Tunnel. An den Knotenpunkten sind teilweise die einzelnen Fahrtrichtungen separat signalisiert. Des Weiteren führen Straßenbahnschienen an der Strecke entlang, die Haltestellen befinden sich auf der baulichen Richtungstrennung der Fahrbahnen. Bushaltestellen befinden sich am rechten Fahrbahnrand. Es wird parallel zur Fahrbahn geparkt und es gibt einige Einfahrten zu Grundstücken wie Tankstellen oder Supermärkten. Der Radverkehr wird auf einem separaten Fahrradweg geführt. An manchen Stellen wird das Einfädeln gefordert, da Fahrstreifen enden. Bei einer durchschnittlichen Fahrt auf dem 3,8 km langen Rundkurs werden etwa 45 verschiedene Fahrsituationen durchfahren und es müssen 17 Manöveränderungen durchgeführt werden.

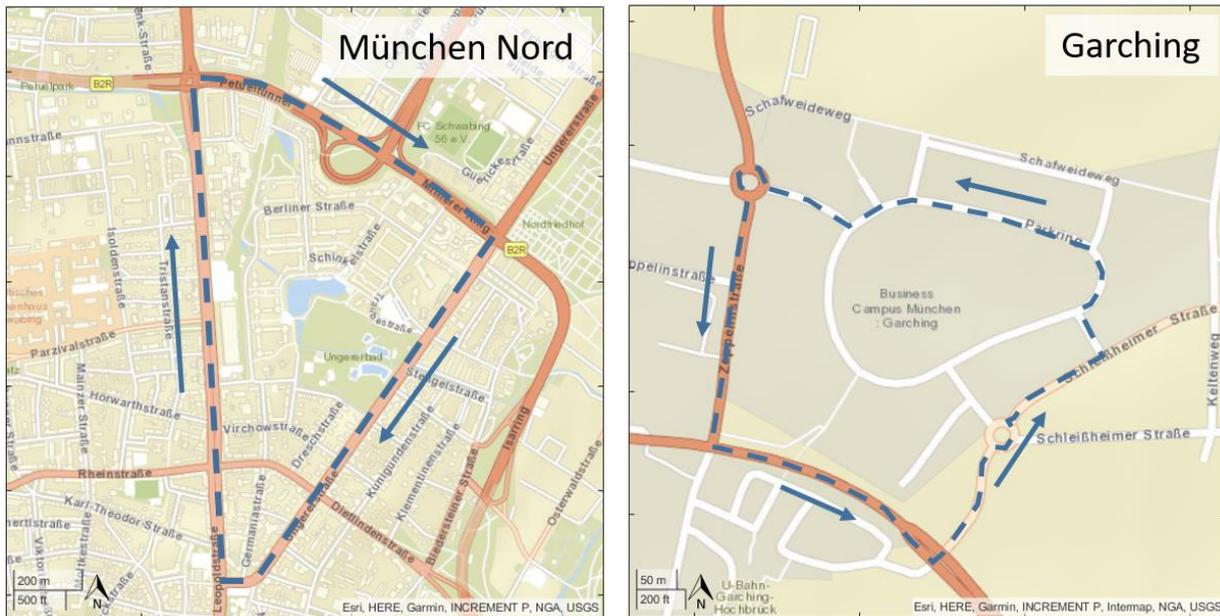


Abbildung 4.1: Kartendarstellung der Testrouten München Nord (links) und Garching (rechts)

Die zweite in dieser Arbeit betrachtete Testroute liegt im Norden außerhalb Münchens in der Stadt Garching (Abbildung 4.1 rechts). Die Strecke hat eine Länge von 1,7 km und führt durch ein Gewerbegebiet auf dem sog. Parkring entlang einer kleineren Erschließungsstraße freigegeben für Verkehr in zwei Richtungen jedoch ohne Fahrbahnmarkierungen. Es befinden sich zwei Kreisverkehre auf dem Rundkurs. Der Parkring ist an größere Landstraßen angebunden, auf denen teils bauliche Trennungen zwischen den Richtungsfahrbahnen existieren. Diese Straßen werden durch signalisierte Knotenpunkte mit separaten Abbiegesignalen verbunden. Weitere Knotenpunkte haben keine Signalisierung. Außerdem existieren Zebrastreifen für Fußgänger und etliche verkehrsregelnde Beschilderungen, die den Fahrzeugen auf dem Parkring an einigen Einmündungen die Vorfahrt gewähren. Auch Bushaltestellen existieren auf der Strecke. Auf diesem Kurs existieren im Durchschnitt ca. 31 Situationen pro Runde, wobei im Mittel 19 Manöveränderungen notwendig sind.

Diese zwei sehr verschiedenen Gebiete wurden dazu verwendet, die Beschreibungsform für Fahrsituationen zu entwickeln und zu testen. Des Weiteren sollen die erhobenen Daten als Testdatensatz für die Zuordnung von Verkehrsregeln und Konflikten sowie für die darauf aufbauende Entscheidungsfindung dienen. Somit kann die Nutzbarkeit für praktische Anwendungen gezeigt werden.

4.1.1 Analyse von Verkehrsunfällen im Untersuchungsgebiet München Nord

Dem automatisierten Fahren werden positive Wirkungen auf die Verkehrssicherheit zugesprochen, insbesondere, da ein Großteil der Verkehrsunfälle auf menschliche Fehler zurückzuführen ist. Da diese als kritisch zu klassifizierenden Situationen bei der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge interessant sind und besonders adressiert werden sollen, werden hier Verkehrsunfälle menschlicher Fahrer betrachtet. Dieser Abschnitt untersucht die Verkehrsunfälle auf

den drei Straßen der Untersuchungsstrecke im Münchener Norden, um die Unfallschwerpunkte und weitere Parameter der Unfälle auf dieser Strecke zu identifizieren. Es wurden Verkehrsunfalldaten, die vom zuständigen Polizeipräsidium München bereitgestellt wurden, analysiert und ausgewertet. Es stehen Daten von den Jahren 2012 bis 2017 für die drei Hauptverkehrsstraßen der Untersuchungsrouten München Nord (Leopoldstraße, Schenkendorfstraße und Ungererstraße) zur Verfügung. Insgesamt handelt es sich dabei um 5 509 Unfälle, wobei 800 Unfälle mit Personenschaden sind (Modus P), 1 146 Unfälle mit Sachschaden (Modus S) und 3 563 als Kleinunfälle (Modus K) klassifiziert wurden. Bei den Unfällen mit Personenschaden (als U(P) bezeichnet) wird weiterhin zwischen Unfällen mit Getöteten (3), Unfällen mit Schwerverletzten (56) und Unfällen mit Leichtverletzten (741) unterschieden. Es gilt bei dieser Unterscheidung jeweils die schwerste Unfallfolge, das heißt, wenn es bei einem Unfall sowohl Schwer- als auch Leichtverletzte gab, wird der Unfall zu einem Unfall mit Schwerverletzten gezählt. Des Weiteren werden Unfälle mit Getöteten und Unfälle mit Schwerverletzten zu Unfällen mit schwerem Personenschaden zusammengefasst (als U(SP) bezeichnet). Viele der Unfälle werden bei der Unfallaufnahme durch die Polizei zwar erfasst, jedoch werden nicht alle Eigenschaften der Unfälle genauer spezifiziert. Aus den 5 509 Unfällen können somit nur 1 946 Unfälle im Hinblick auf Unfalltyp, Unfallart, etc. weiter untersucht werden. Bei allen Unfällen, die nicht genauer spezifiziert sind, handelt es sich um Kleinunfälle. Die folgenden Abschnitte enthalten Auswertungen im Hinblick auf die genauen Ursachen und Unfallkonstellationen. [POLIZEIPRÄSIDIUM MÜNCHEN 2017]

Was bei der Analyse der Verkehrsunfalldaten zunächst auffällt ist, dass alle Unfälle mit Getöteten den gleichen Unfalltyp, also die gleiche Konfliktsituation, haben. Alle drei Unfälle mit Getöteten sind Überschreiten-Unfälle, bei denen der Unfall aus einem „Konflikt zwischen einem Fahrzeug und einem Fußgänger auf der Fahrbahn“ entstanden ist. Der Überschreiten-Unfall beinhaltet nur Konflikte mit Fußgängern, die nicht in Längsrichtung gingen (sonst würden sie zum Unfall im Längsverkehr zählen) und solche bei denen das Fahrzeug nicht abgelenkt ist (sonst würden sie zum Abbiege-Unfall, bzw. Einbiegen/Kreuzen-Unfall zählen). Ein Unfall des Typs Überschreiten bedeutet nicht unbedingt, dass der Fußgänger vom Fahrzeug erfasst wurde. Außerdem gehören alle Unfälle mit Getöteten zur selben Unfallart, dem Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger. Zu den Unfallursachen gehören bei allen drei Unfällen falsche Verhaltensweisen der Fußgänger. Dieser Aspekt ist besonders interessant, da es erneut verdeutlicht, dass auch ein automatisiertes Fahrzeug ständig mit Fehlern anderer rechnen muss, um den Straßenverkehr sicherer zu machen.

Zwei der drei Unfälle mit Getöteten sind besonders interessant, da sie auch für die Sensorik automatisierter Fahrzeuge eine Herausforderung darstellen könnten. Dies sind die Unfälle bei denen die Ursache 63 aufgeführt wird, was das „plötzliche Hervortreten hinter Sichthindernissen“ ist. Dieses Verhalten ist auch bei elf weiteren Unfällen als Ursache dokumentiert. Bei allen diesen Unfällen gehörte auch das Verhalten „ohne auf den Fahrzeugverkehr zu achten“ der Fußgänger zu den Unfallursachen (Unfallursache 64). Betrachtet man die Charakteristik der Unfallstellen genauer, ist auffällig, dass zwei der Unfälle mit Getöteten an Haltestellen

aufgetreten sind. Während zwei der Unfälle mit Getöteten lediglich Ursachen bei den Fußgängern aufführen, ist bei dem dritten Unfall auch das „Falsche Verhalten gegenüber Fußgängern“ aufgeführt, in diesem Fall Ursache 41 „an Haltestellen“.

Die Aufteilung aller (genauer spezifizierten) Verkehrsunfälle ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Unfälle des Typs *Überschreiten* machen in diesem Fall den geringsten Anteil aus. Abgesehen von den Unfällen, die als „Sonstiger Unfall“ typisiert werden, welche meist Unfälle im Zusammenhang mit ruhendem Verkehr sind, sind die meisten Unfälle im Längsverkehr passiert. Hierbei gab es in den meisten Fällen einen Zusammenstoß mit einem Fahrzeug das vorausfuhr oder wartete, der klassische Anwendungsfall des ACC Systems. Auch die Unfälle, die der Unfallart 1 angehören, *Zusammenstoße mit einem Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht*, sind oftmals Unfälle, die durch bestehende Fahrerassistenzsysteme, wie das ACC oder den Parkassistenten, adressiert werden. Die Unfälle der Arten *Zusammenstoß mit einem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt*, können teilweise von Systemen wie dem Querverkehrsassistenten, welche sich aktuell in Entwicklung befinden, adressiert werden. Unfälle der Art 3, *Zusammenstoß mit einem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt* können ebenfalls teilweise bereits heute durch bestehende Assistenzsysteme, wie das Spurhalteassistentensystem verhindert werden. Ist jedoch ein Fahrzeugführer ohne ein solches System Verursacher des Unfalls, gilt es, die Trajektorie dieses Fahrzeuges frühzeitig vorherzubestimmen und Maßnahmen einzuleiten, die den Zusammenstoß verhindern.

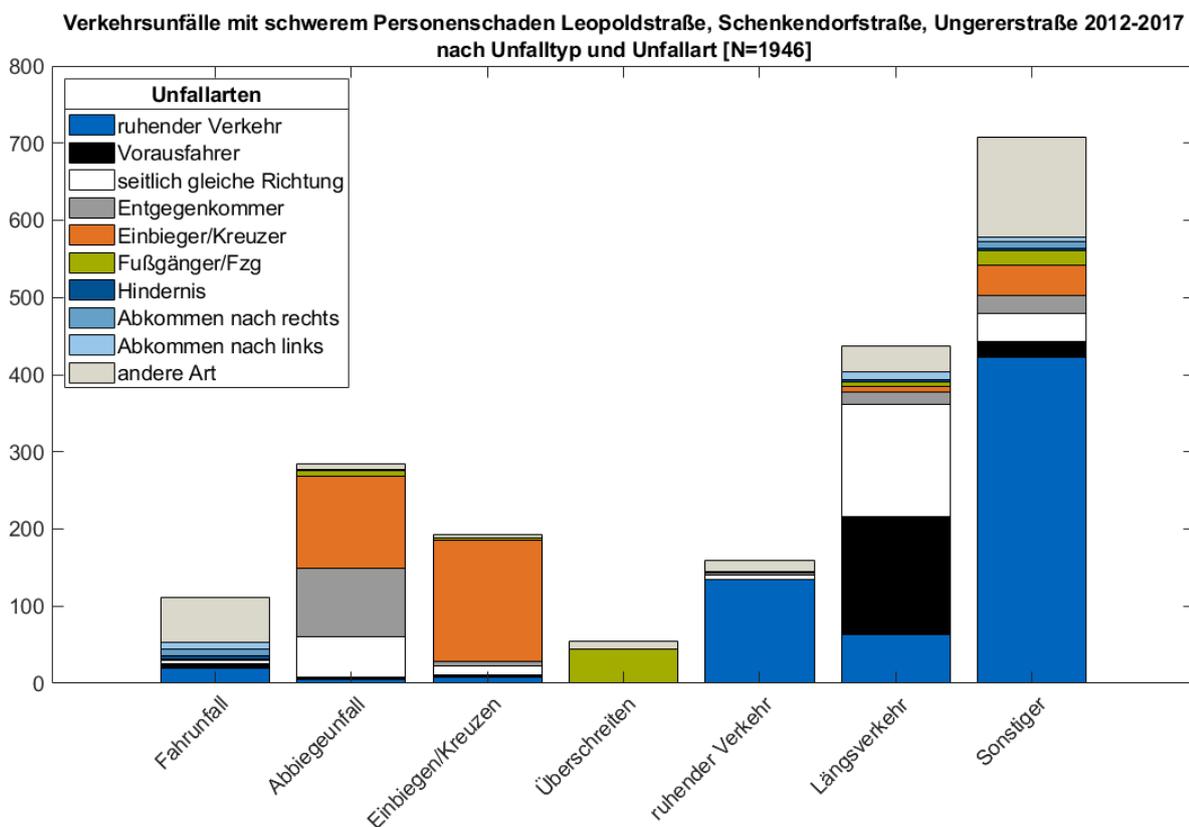


Abbildung 4.2: Unfalltypen und -arten der Verkehrsunfälle mit Personenschaden auf den Straßen der Untersuchungsroute

Betrachtet man weitere Unfallfolgen, fällt auf, dass der größte Anteil der Unfälle mit schwerem Personenschaden im Untersuchungsgebiet beim Abbiegen, Einbiegen oder Kreuzen passierte. Hierbei waren meist Fahrradfahrer am Unfall beteiligt. Insbesondere das Rechtsabbiegen scheint eine kritische Situation zu sein, wenn Fahrradfahrer beachtet werden müssen, hierbei passieren die meisten Fehler.

Bei den Unfallursachen wurde das fehlerhafte Wechseln des Fahrstreifens beim Nebeneinanderfahren oder Nichtbeachten des Reißverschlussverfahrens am häufigsten als Unfallursache identifiziert. Der „ungenügende Sicherheitsabstand“ und „Fehler des Fahrzeugführers im Zusammenhang mit Vorfahrt/Vorrang“ führten ebenfalls häufig zu Unfällen.

Für 1751 der 5509 Unfälle konnten die dreistelligen Unfalltypen des Unfalltypenkatalogs des GDV zugeordnet werden. Dies wurde mit Hilfe der manuellen Auswertung der Kurzsachverhalte vorgenommen. Die geringe Anzahl liegt zum einen daran, dass diese Beschreibungen des Unfallhergangs nur für eine bestimmte Zeit gespeichert und danach aus den digital erfassten Berichten gelöscht werden. Für das am weitesten zurückliegende Jahr der betrachteten Daten lagen diese Beschreibungen also nicht mehr vor und konnten somit nicht ausgewertet werden. Des Weiteren ist es bei vielen der Unfälle nicht ohne weiteres möglich, einen Unfalltyp nach der Spezifizierung des GDV zuzuordnen, da dies eine sehr detaillierte Erfassung des Unfalls benötigt, wie im Kapitel 3.3 erläutert. Insbesondere bei Kleinunfällen wird in der Beschreibung aus Gründen der Zeitersparnis häufig allgemeiner formuliert, sodass ein Rückschluss auf den entsprechenden dreistelligen Typencode nicht mehr möglich ist. In der Abbildung 4.3 ist ein Beispiel für eine Zuordnung vorgestellt, darin wird die Unfallbeschreibung zitiert und der entsprechende Unfalltyp abgebildet.

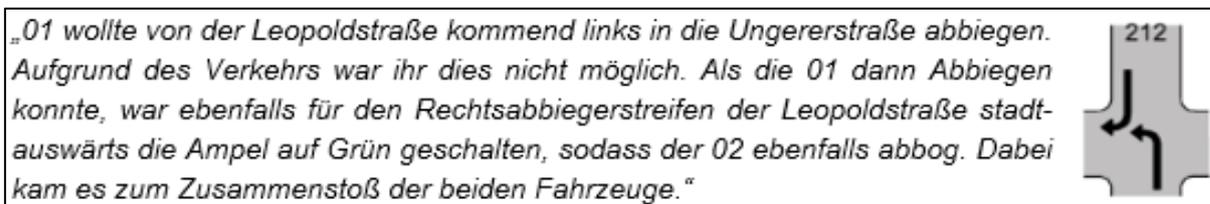


Abbildung 4.3: Zuordnung einer Unfallbeschreibung zu einem Unfalltypen des GDV Unfalltypenkatalogs

Die Häufigkeiten und Schweregrade der Unfälle im Untersuchungsgebiet können dazu dienen, einzelne Konflikte, die in den Fahrsituationen bestehen, besser zu bewerten. Darauf wird im Kapitel 6 näher eingegangen. Die folgenden Abschnitte beschreiben zunächst eine Methodik zuzuordnen, welche Verkehrsregeln und Gefahren in den jeweiligen Fahrsituationen beachtet werden müssen.

4.2 Zuordnung von Fahrsituationen zu Verkehrsregeln und Gefahren

Innerhalb der Datenbank werden alle Fahrsituationen beschrieben, in die das Ego-Fahrzeug während der Befahrungen gekommen ist. Hierbei geschieht es häufig, dass sehr ähnliche

Fahrsituationen auftreten. Um die Auswertung der verschiedenen Situationen zu erleichtern, sollen die Einzelsituationen klassifiziert werden. Für spätere Auswertungen ist es häufig ausreichend, Situationen gleichen Typs gemeinsam zu betrachten. Die Anzahl der Klassen ist geringer als die der Situationen, was die Komplexität reduziert. Nach einer Einteilung von Situationen in Situationsklassen kann beispielsweise identifiziert werden, welche Situationsklassen besonders häufig auftreten (hohe Anzahl von Situationen in der entsprechenden Klasse), oder es kann für jede Situationsklasse bestimmt werden, ob diese Art Fahrsituation von einer automatisierten Fahrfunktion gelöst werden kann. Die Situationen, die zur gleichen Situationsklasse gehören, stellen Varianten dar.

Die Einteilung von einzelnen Objekten in verschiedene Klassen kann auf verschiedene Methoden geschehen. Werden die Klassen, in die die Daten (in diesem Fall: Fahrsituationen) eingeteilt werden sollen, vorgegeben, spricht man von Klassifikation. Sollen sich hingegen die Klassen erst aus den Objekten ergeben, so spricht man von Clustering. Das Clustering spaltet einen Datensatz in eine zumeist vorgegebene Anzahl an Gruppen auf, indem es dem Ziel folgt, dass die Daten innerhalb der Gruppe möglichst homogen sind und die verschiedenen Gruppen möglichst heterogen. Sind die Cluster definiert, können neue Daten diesen wiederum durch Klassifikation zugeordnet werden.

Um Situationen klassifizieren zu können, ist es nötig, Anforderungen an die Einheitlichkeit von Situationen innerhalb einer Klasse zu definieren, sowie grundsätzlich zu spezifizieren, was eine Klasse aussagen soll. Innerhalb dieser Arbeit sollen Situationsklassen erarbeitet werden, die bei der Entscheidung der Fahraufgaben automatisierter Fahrzeuge genutzt werden können. Dabei gilt es, für die Algorithmen der Fahrzeuge, sowie auch für Fahrer in konventionellen Fahrzeugen, aus der Analyse der Situation die möglichen Handlungsoptionen für das Fahrverhalten des Ego-Fahrzeugs abzuleiten. Eine Situationsklasse soll also Situationen zusammenfassen, in denen dem Fahrer bzw. dem System dieselben Handlungsoptionen zur Verfügung stehen. Außerdem sollen die Randbedingungen der Fahrsituation die gleichen sein, sodass auch die gleichen Verkehrsregeln anzuwenden sind, das heißt, dass beispielsweise die Kategorie der Infrastruktur, die Verkehrsregelung oder die Objekte innerhalb einer Klasse gleich sein sollten.

Eine Situationsklasse wird als eine Zusammenfassung ähnlicher Fahrsituationen des Straßenverkehrs aus Sicht einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit definiert, die aus einer Konstellation von statischen und dynamischen Objekten und Infrastruktur bestehen und in den selben Handlungsoptionen für den Fahrer bzw. das System resultieren.

Die Klassen der Fahrsituationen können auch als Fahraufgaben beschrieben werden. Jede Klasse beschreibt eine Situation mit ihren Eigenschaften und den Handlungen des Fahrzeugs, aus dessen Perspektive die Situation betrachtet wird. In den Fragebögen zur theoretischen Führerscheinprüfung werden Situationen vorgestellt, bei denen es jeweils ein richtiges Fahrverhalten gibt, welches in der Situation durch den Fahrzeugführer anzuwenden ist. Während der Fahrschulung soll durch die theoretischen und praktischen Beispiele verschiedener

Fahrsituationen in den unterschiedlichen Umgebungen alle Regeln des Verhaltens beim Führen eines Fahrzeugs demonstriert werden. Alle Situationen werden nur beispielhaft aufgeführt, es ist jeweils möglich, dass Fahrschüler während der Führerscheinausbildung gewisse Fahrsituationen während der praktischen Ausbildung gar nicht im realen Straßenverkehr erleben. Durch den zusätzlichen theoretischen Teil der Fahrschulung wird sichergestellt, dass dem Fahrschüler alle Verkehrsregeln beigebracht werden. Auch kann es sein, dass im realen Straßenverkehr die Situationen nur in ähnlicher Form auftreten, es wird erwartet, dass der Fahrschüler jeweils dazu in der Lage ist zu abstrahieren und das Gelernte aus anderen Situationen auf die neuen Situationen anwenden kann.

In der entwickelten Datenbank sind Verkehrs- und Verhaltensregeln, die aus den Fragen der theoretischen Führerscheinprüfung und einigen Erweiterungen bestehen, beschrieben. Sie stellen Situationsklassen nach der in dieser Arbeit verwendeten Definition dar. Es werden jeweils die Merkmale der Situation und die daraus folgende Handlungsanweisung beschrieben. Auch die Relevanz der einzelnen Aspekte wird berücksichtigt. Geht man davon aus, dass diese Situationsklassen nun alle Verkehrsregeln abbilden, sollte der Fahrer stets in der Lage sein, die korrekte Handlung für die aktuelle Situation zu finden, wenn er die aktuelle Situation einer der Klassen zuordnen kann. Situationen, die meist nicht in den Fragen dargestellt sind, sind solche, in denen der Fahrer auf keine Besonderheiten achten muss und sein Wunschmanöver ausführen kann ohne beeinflusst zu sein.

Ziel ist es also, die in den Befahrungen aufgenommenen Fahrsituationen den Situationsklassen zuzuordnen. Das dazu verwendete Verfahren des Data Matching wird im Folgenden Abschnitt 4.2.1 beschrieben und die spezielle Anwendung für die Zuordnung von Fahrsituationen auf die Verkehrsregeln in Kapitel 4.2.2.

Mit dem Unfalltypenkatalog des GDV existiert eine komplette Liste an möglichen Konflikten in den verschiedensten urbanen Fahrsituationen. Die Methodik des Data Matching wird auch dazu verwendet, die Fahrsituationen aus den Befahrungen den Unfalltypen des Kataloges zuzuordnen um jeweils relevante Konflikte zu identifizieren. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4.2.3 vorgestellt.

4.2.1 Klassifikation von Fahrsituationen mittels Data Matching

Nachdem die Fahrsituationen sowie die Verhaltensregeln und Unfalltypen in einem standardisierten Datenformat gespeichert sind, ist es mit Hilfe einer Klassifikation möglich, gleiche Attribute in den Beschreibungen der Situationen zu identifizieren und so die Liste an möglichen Kandidaten von Regeln, die in jeder Fahrsituation gelten könnten und Konflikten, die aus der Situation resultieren könnten, zu reduzieren. Dafür wird das *Data Matching* verwendet und ein Algorithmus entwickelt, der schrittweise vorgeht. Das Vorgehen ist in der **Abbildung 4.4** dargestellt und wird im Folgenden genauer erläutert.

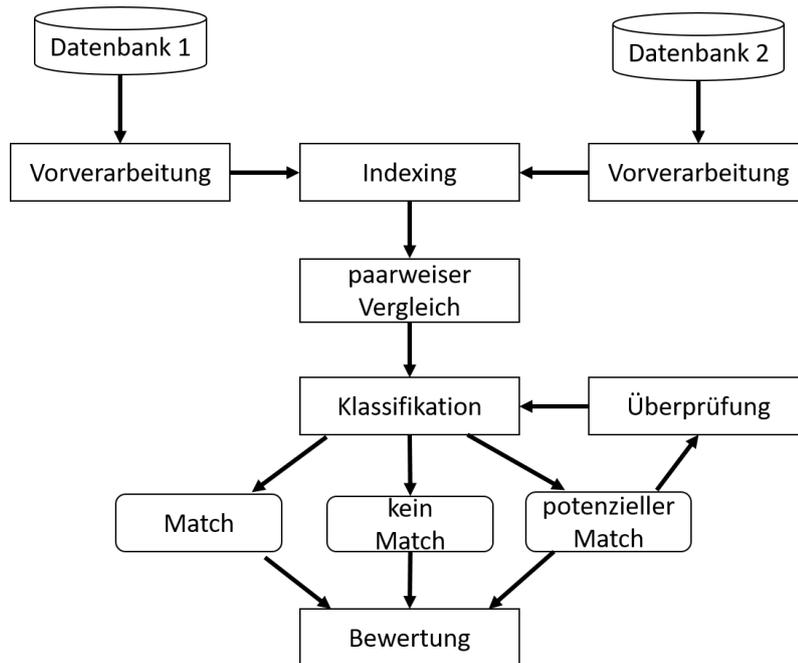


Abbildung 4.4: schematische Darstellung des Vorgehens beim Data Matching nach [CHRISTEN 2012]

Die zwei in Abbildung 4.4 dargestellten Datenbanken entsprechen in diesem Beispiel den Fahrsituationen des Realverkehrs und den Verkehrsregeln bzw. den Unfallsituationen, also die zuzuordnenden Datenquellen. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, werden die Daten in diesem Fall nicht in unterschiedlichen Datenbanken, sondern lediglich in unterschiedlichen Tabellen einer Datenbank gespeichert, die Funktionsweise ist jedoch die gleiche. Im ersten Schritt, der *Vorverarbeitung*, werden die Datenquellen standardisiert. Dies ist bereits in der Datenaufbereitung geschehen, in der die Fahr- und Unfallsituationen in das Beschreibungsformat der Datenbank übertragen wurden.

Im zweite Schritt des Data Matching, dem *Indexing*, werden nun Kandidaten der Verkehrs- bzw. Unfallregeln ausgewählt, die zu der betrachteten Fahrsituation gehören könnten. Hierbei werden Attribute der einen Datenbank(-tabelle) mit Attributen der zweiten Datenbank(-tabelle) verglichen. Das klassische Data Matching wird häufig dazu verwendet, Duplikate in einer Datenbank ausfindig zu machen oder dieselben Objekte (beispielsweise Kunden) in zwei unterschiedlichen Datenbanken zu finden. Somit werden in diesem Schritt die Einträge aus Spalten verwendet, die sich normalerweise nicht ändern, das können beispielsweise Namen (in Kundendatenbanken) oder Identifikationsnummern sein. [CHRISTEN 2012] Da in der Datenbank der Fahrsituationen jedoch keine Duplikate gefunden werden sollen, sondern passende Verhaltensregeln oder Unfalltypen, muss ein Attribut gefunden werden, was für die Vorauswahl bedeutsam ist. Als sinnvoll erscheinen für den Fall der Fahrsituationen beispielsweise der Infrastrukturtyp oder das Manöver des Ego-Fahrzeugs. Da Regeln und Unfälle jedoch nicht immer infrastrukturabhängig sind, wird innerhalb des in dieser Arbeit gewählten Vorgehens das Wunschmanöver des Ego-Fahrzeugs für den Schritt der Vorauswahl verwendet. Somit kann die Liste der Kandidaten reduziert werden.

In den folgenden Schritten gilt es, eine weitere Reduktion der Kandidaten zu erreichen, ohne dabei zu viele Kandidaten auszusortieren. Hierfür wird das Relevanz-Attribut verwendet, welches in den Einträgen in der Datenbank den Objekten oder anderen Elementen der Beschreibung zugeordnet wurde. Ist bei den Verkehrsregeln oder Unfallsituationen beispielsweise beschrieben, dass sich ein Objekt rechts vom Ego-Fahrzeug befindet, wurde dieses Positionsattribut in der Datenbank als relevant gekennzeichnet. Relevant ist in dem Beispiel also nur die laterale Position relativ zum Ego-Fahrzeug, andere Attribute, wie beispielsweise der Fahrzeugtyp evtl. aber nicht.

Des Weiteren wurden globale Regeln definiert, die sich nicht auf ein bestimmtes Objekt beziehen, sondern beispielsweise auf den Verkehrszustand oder auf den Typ der Infrastruktur. Hierbei können auch Zusammenfassungen geschehen, beispielsweise, wenn es nicht relevant ist, ob es sich um eine Kreuzung oder Einmündung handelt, in jedem Fall jedoch ein Knotenpunkt vorhanden sein muss. Auch Signalgeber mit gleicher Bedeutung können in manchen Fällen zusammengefasst werden. Solche Gruppierungen sind bereits in den Datenbanktabellen zu den Objekten und Infrastrukturen vorhanden. In der Relevanz-Kennzeichnung kann dann auf den entsprechenden Eintrag verwiesen werden (beispielsweise Objekt-Gruppe oder konkretes Objekt).

Alle Regeln und Unfalltypen, die im Schritt des Indexing als Kandidaten identifiziert wurden, werden nun mit der betrachteten Situation verglichen. Im paarweisen Vergleich werden alle als relevant gekennzeichneten Attribute mit den Attributen der Situation verglichen. Ist ein relevantes Attribut nicht in der Situation vorhanden, wird der Kandidat aus der Liste entfernt. Die Situation wird also nicht zu der Verkehrsregel bzw. dem Unfalltyp klassifiziert, es ergibt sich *kein Match*. Sollten die relevanten Attribute auch in der Situation vorhanden sein, ergibt sich ein *Match*. In der betrachteten Anwendung kann es immer weitere Zweifel geben, dass eine Situation tatsächlich zu einer Regel oder einem Unfalltyp gehört, wie im folgenden Kapitel 4.2.2 genauer erläutert wird. Daher ergeben sich aus diesem Data Matching nicht wie im klassischen Fall Match, potenzieller Match oder kein Match, sondern lediglich kein Match oder potenzieller Match. Alle potenziellen Matches werden dann manuell überprüft um eine finale Beurteilung zu erlangen. Nachdem alle Kandidaten mit der Situation verglichen wurden und die Liste dementsprechend reduziert wurde, bleibt also meist eine Liste finalen Kandidaten bestehen. Dies ist in dieser Anwendung sinnvoll, da in einer Fahrsituation auch mehrere Verkehrsregeln gleichzeitig gelten können. Abbildung 4.5 zeigt das Vorgehen angepasst auf die Anwendung für die vorliegenden Fahrsituationen. Im Bild ist mit Datenbank 2 die Datenbasis, die die Verkehrsregeln beschreiben, also die Fragen aus den Fragebogenkatalog und die in dieser Arbeit hinzugefügten Erweiterungen, beschrieben. Das gleiche Vorgehen gilt allerdings auch, wenn die Datenbank 2 die Situationen des Unfalltypenkatalogs sind. Die Ergebnisse beider Anwendungen werden in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

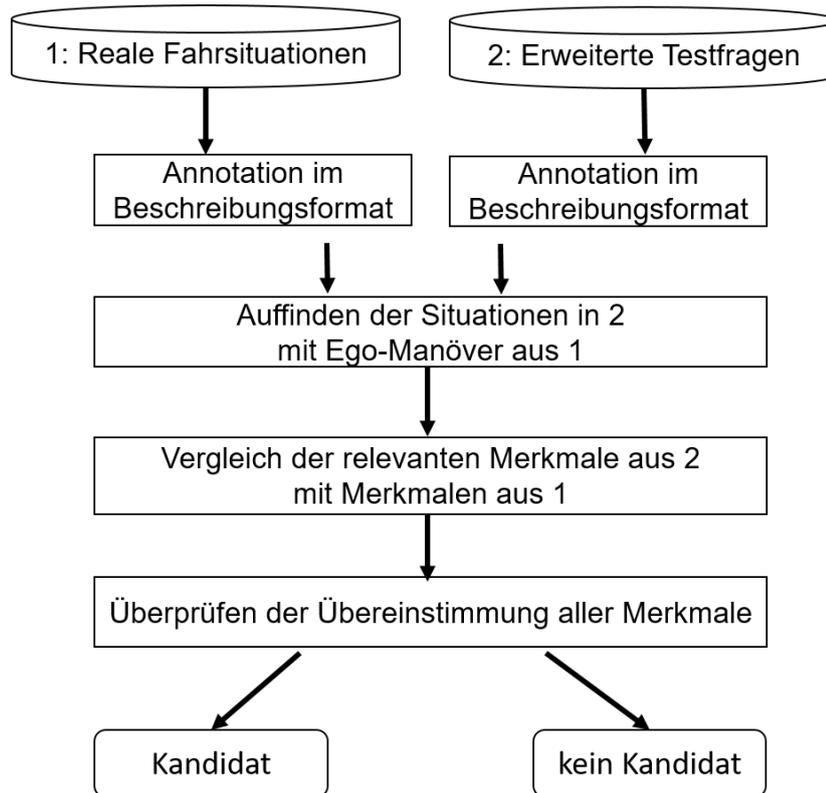


Abbildung 4.5: Vorgehensweise des der Klassifikation mittels Data Matching in der Anwendung der Zuordnung von Fahrsituationen zu Verkehrsregeln aus den erweiterten Testfragen des Fragebogenkatalogs zur theoretischen Führerscheinprüfung

Eine Bewertung der Klassifikation kann in dieser Anwendung nicht wie in klassischen Klassifikationsproblemen über Kennwerte wie Genauigkeit oder Trefferquote der Klassifikation geschehen. Das liegt daran, dass für diese Zuordnung keine Grundwahrheit vorhanden ist, mit der das Klassifikationsergebnis verglichen werden kann. Die Überprüfung erfolgt in diesem Fall manuell. Die folgenden Abschnitte geben die Ergebnisse der Zuordnungen der Fahrsituationen zu Verkehrsregeln (vgl. Kapitel 4.2.2) bzw. den Unfalltypen (vgl. Kapitel 4.2.3) wider und beleuchten die Eignung sowie auch die Schwierigkeiten und Grenzen des Vorgehens.

4.2.2 Zuordnung von Fahrsituationen zu Verkehrsregeln

Das Data Matching wurde für jede der mehr als 2800 Fahrsituationen, die in der Datenbank vorhanden sind, realisiert. Für 307 Fahrsituationen des Testgebietes Garching, welches eine größere Anzahl verschiedener zu beachtender Verkehrsregeln und Infrastrukturtypen hat, werden im Folgenden einige Auswertungen aufgeführt.

Für die 307 Testsituationen konnten mehrere Übereinstimmungen für jede Situation gefunden werden außer für 35 der Fahrsituationen. Das waren ausschließlich solche, in denen keinerlei andere Objekte in der Szene vorkommen. Bei diesen jedoch ist die Fahraufgabe lediglich das Wunschmanöver durchzuführen und die Wunschgeschwindigkeit zu fahren, sofern dies ge-

stattet ist. In diesen Situationen gelten lediglich die grundsätzlichen Fahrregeln wie das Befahren von dafür gewidmeten Flächen sowie das Beachten von Geschwindigkeits- und Richtungsbeschränkungen. Diese sind jeweils über die Informationen zur Infrastruktur bzw. den Markierungen und Beschilderungen vorhanden.

Ist in einer Fahrsituationsbeschreibung keine Information zu diesen Attributen vorhanden, müssen Informationen aus vorangegangenen Situationen (beispielsweise letzte Beschilderung für eine Geschwindigkeitsbeschränkung) oder Kartendaten herangezogen werden. Solche Informationen sollten also für eine längere Dauer gespeichert werden und ebenfalls für die Entscheidung, insbesondere bei der Trajektorienplanung hinzugezogen werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird darauf jedoch nicht weiter eingegangen.

Die Anweisungen zu einzuhaltenden Regeln bei Vorhandensein gewisser Beschilderungen und Markierungen sind Teil des Fragebogenkatalogs im Abschnitt 1.4 Verkehrszeichen sowie in der Straßenverkehrsordnung ab § 39 sowie den dazugehörigen Anlagen. Sie wurden separat auch in der Datenbank gespeichert und können so in jeder Situation in der ein Verkehrszeichen vorhanden ist, abgerufen und bei der Auswahl der Fahrstrategie berücksichtigt werden.

Bei der Bewertung der Klassifikationsqualität konnten einige Aspekte identifiziert werden, die auch nach erfolgter Klassifikation nicht aus der Liste der Kandidaten eliminiert wurden. Eine Schwierigkeit, die durch die Methodik nicht abgefangen werden kann, ist die Bedeutung des Nicht-Vorhandenseins bestimmter Attribute. An Knotenpunkten ist es beispielsweise relevant alle vorhandenen Verkehrszeichen zu erkennen. Es gelten jedoch auch spezielle Regeln, wenn kein Verkehrszeichen vorhanden sein sollte. Der Fahrer oder das System muss also mit Sicherheit identifizieren, dass ein gewisses Zeichen *nicht* vorhanden ist. Die Regeln zu rechtsvor-links geregelte Knotenpunkten würden sonst immer in der Liste der Kandidaten verbleiben, auch wenn ein Verkehrszeichen vorhanden ist. Die Regeln, die zu diesem Verkehrszeichen gehören sind jedoch zusätzlich in der Liste.

Eine weitere Schwierigkeit, die bei der Analyse der Zuordnungen auffiel ist, dass die Erkennung von Objekten häufig nicht ausreicht, um eine Situation zu interpretieren, sondern ebenfalls erkannt werden muss, welche Intentionen die Objekte haben. So muss also die Prädiktion der Objekte gut sein, damit die korrekte Verkehrsregel angewandt werden kann. Hierfür müssen in vielen Fällen mehrere Objekte gleichzeitig erkannt werden und die Bewegungen dieser in Abhängigkeit voneinander prädiziert werden. Auch das Erkennen von Gesten und andere Arten der Kommunikation ist hierbei von Bedeutung. Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, ist dies Teil des Umfeldmodells, woraus die Information in die Manöverplanung eingehen. Die Entscheidung der Fahrstrategie ist, wie auch in den Verkehrsregeln erkennbar, maßgeblich von der Qualität dieser Eingangsdaten abhängig.

Das folgende Beispiel soll die Ergebnisse des Data Matching Prozesses für die Fahrsituationen und Verkehrsregeln aufzeigen. In der Abbildung 4.6 links im Bild ist die aufgenommene

Fahrsituation als Ausschnitt aus dem Videobild erkennbar. Diese wurde dann in ein abstrahiertes Bild mit der Beschreibungsform überführt, die in Kapitel 3 erläutert wurde (mittig im Bild aus dem über die GUI erstellten Bild erkennbar). Das Wunschmanöver des Ego-Fahrzeugs ist in diesem Fall das Geradeausfahren. Im Indexing Schritt werden also alle Verkehrsregeln aus der Datenbank gefiltert, die ebenso dieses Wunschmanöver enthalten. Aus dem Fragenkatalog des theoretischen Führerscheintests lassen sich hierfür etliche Fragen identifizieren, die in der Datenbank als Fahrsituationen aufgeführt sind. Diese Fahrsituationen werden nun vom Matching-Algorithmus einzeln durchlaufen. Es entfallen einige Verkehrsregeln, die relevante Attribute enthalten, welche in der zu analysierenden Fahrsituation nicht vorhanden sind. Am Ende des Data Matching Prozesses verbleiben 7 Situationen in der Liste der Kandidaten. Eine relevante Verkehrsregel aus dem Fragebogenkatalog der theoretischen Führerscheinprüfung ist in Abbildung 4.6 rechts im Bild dargestellt. Weitere sind im Anhang 2 gelistet.

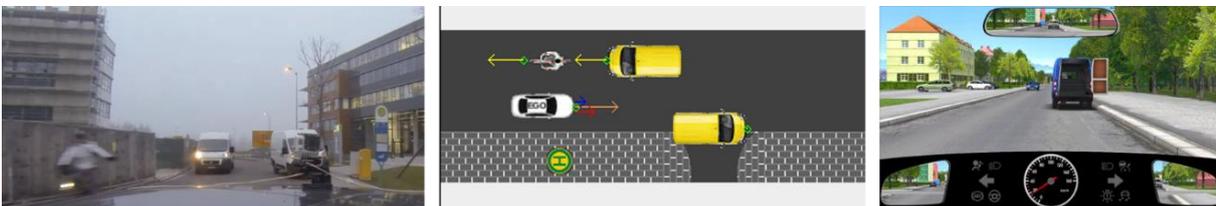


Abbildung 4.6: Videobild einer Fahrsituation im Testgebiet Garching (links) und Übersetzung der Situation in das abstrahierte Beschreibungsformat (mittig) mit einer zugehörigen Verkehrsregel aus den Fragenkatalog (rechts)

Zur Begründung der Sinnhaftigkeit des Verbleibs dieser 7 Kandidaten kann wie folgt argumentiert werden:

- a) Ein stehendes Fahrzeug auf der eigenen Fahrbahn, darf nur überholt werden, wenn der Gegenverkehr dies zulässt. (in der Abbildung 4.6 dargestellt)
- b) Wenn das entgegenkommende Fahrzeug auf die Fahrbahn des Ego-Fahrzeug kommt, muss abgebremst und möglichst weit rechts gefahren werden.
- c) Beim Anfahren muss der rückwärtige Verkehr beachtet werden, geblinkt werden und der fließende Verkehr darf nicht gefährdet werden.
- d) Entgegenkommende Fahrzeuge, die nach links abbiegen möchten, haben keinen Vorrang
- e) Steht das Fahrzeug vor dem Ego-Fahrzeug, weil es links abbiegen will, kann rechts daran vorbeigefahren werden, sofern ausreichend Platz vorhanden ist.
- f) Steht das Fahrzeug vor dem Ego-Fahrzeug, weil es rangieren möchte, soll ausreichend Platz gewährt werden.
- g) Kommt ein Fahrzeug aus einer Einfahrt, muss diesem kein Vorrang gewährt werden, auch, wenn es von rechts kommt.

Die vorgegangene qualitative Auswertung der Ergebnisse ist für alle Fahrsituationen des Testgebietes erfolgt. Wie sich erkennen lässt, ist das Verbleiben der Kandidaten grundsätzlich sinnvoll. Einige Kandidaten können durch die oben genannten Argumentationen zusätzlich aussortiert werden, was über das Matching Verfahren jedoch nicht geschehen ist. Um auch

diese Fälle entsprechen auszusortieren, könnte das Verfahren entsprechend erweitert werden. Im Fall der nicht vorhandenen Objekte könnte dies beispielsweise dadurch realisiert werden, dass die Beschreibung der Fahrsituationen der Verkehrsregeln zusätzlich Objekte vorhanden sein müssten, die ein Attribut „nicht vorhanden“ erhielten. Die Beispiele in der Liste des vorgestellten Beispiels verdeutlichen, dass häufig mehr Informationen über die Situation nötig sind, um zu klären, ob eine bestimmte Verkehrsregel gültig ist oder nicht. Hierfür werden Messwerte wie Abstände aus dem Umfeldmodell oder der Fahrzeugodometrie benötigt. Ein einfacher Abgleich ist jedoch zumeist nicht ausreichend, da auch in den Verkehrsregeln der in der Liste genannten Situationen keine eindeutigen Werte geliefert werden. So muss von Fahrer in der Situation abgeschätzt werden, ob der Gegenverkehr ein Überholen des stehenden Fahrzeugs erlaubt. Für die anderen Begründungen e) und f) aus der Liste wird erneut deutlich, dass die Intentionen des Fahrzeugs, welches vor dem Ego-Fahrzeug steht, korrekt erkannt werden müssen.

Es kann geschlussfolgert werden, dass das Data Matching für Fahrsituationen und Verkehrsregeln eine funktionierende Methode ist und passende Ergebnisse liefert. Der Testdatensatz zeigt, dass stets korrekte Fahrsituationen aus den Verkehrsregeln identifiziert werden konnten. Die Ergebnisse des Data Matching sind jedoch noch nicht direkt für eine Formulierung einer Fahrstrategie verwendbar. Es müssen nachgelagert noch weitere Schritte erfolgen, um eine Entscheidung für das Fahrverhalten des Ego-Fahrzeugs treffen zu können. In dieser Arbeit wird dafür Fuzzylogik verwendet, welche in Kapitel 5 vorgestellt wird. Zusätzlich kann es von Bedeutung sein, zu eruieren, welche der Verkehrsregeln besonders wichtig sind. Einige der Fahrsituationen aus dem Fragenkatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung geben Verkehrsregeln wieder, andere verdeutlichen eher soziale Normen im Verkehr. Um solch eine Bewertung durchzuführen, können die Punkte, welche für die korrekte Beantwortung der Fragen vergeben werden, herangezogen werden. Eine Vorgehensweise für eine solche Bewertung der Wichtigkeit von Verkehrsregeln und Normen wird in Kapitel 6 vorgestellt. Zusätzlich zu den Verkehrsregeln wurde das Data Matching Verfahren auch auf die Unfalltypen angewendet. Die Ergebnisse daraus werden im folgenden Abschnitt 4.2.3 vorgestellt.

4.2.3 Zuordnung von Fahrsituationen zu Unfallsituationen und Konflikten

Um einer Fahrsituation einen Konflikt, und damit einem potenziell entstehenden Unfall zuzuordnen, können die strukturierten Beschreibungen der Situationen verwendet werden. Nachdem der Unfalltypenkatalog des GDV in die Beschreibungsform der Fahrsituationen überführt wurde, können entsprechende Fahrsituation zugeordnet werden. Es wird wiederum das Data Matching Verfahren, welches in Kapitel 4.2.1 vorgestellt wurde, verwendet. Somit können zu jeder aufgezeichneten Fahrsituation aus dem Testgebiet mögliche resultierende Unfalltypen gefunden werden.

Der Unfalltypenkatalog des GDV beinhaltet zunächst nur wesentliche Aspekte einer Unfallsituation. Andere Objekte, die nichts zu einem Unfall beigetragen, haben finden in den Beschreibungen der Unfalltypen keine Erwähnung. Das Attribut der Relevanz gilt also prinzipiell für

alles in der Situationsbeschreibung Vorhandene. Lediglich in einigen Aspekten wurde die Beschreibung erweitert, das betrifft insbesondere Verallgemeinerungen. Unfälle, welche beispielsweise mit dem Abbiegen in Verbindung stehen werden im Unfalltypenkatalog stets auf einer Kreuzung dargestellt, denkbar ist jedoch auch, dass die Unfälle an Einmündungen oder Kreisverkehren, teilweise auch auf Strecken, beispielsweise bei Vorhandensein von Grundstückseinfahrten, vorkommen. Die Unfalltypen wurden dahingehend analysiert und an sinnvollen Stellen Verallgemeinerungen in der Beschreibung getroffen, sodass in den Fahrsituationen entsprechend alle möglichen Unfalltypen gefunden werden können. Des Weiteren können einige objektspezifische Eigenschaften auf Relevanz analysiert werden. Im Unfalltypenkatalog werden Objekte in Form von Pfeilen dargestellt (vgl. Abbildung 3.7). Der Objekttyp ist bei Fahrzeugen meist nicht relevant. Insbesondere bei Verkehrsunfällen mit verletzlichen Verkehrsteilnehmern werden diese jedoch explizit genannt, da in diesem Fall auch die Unfallfolgen schwerer sein können. Somit ist es auch bei den Beschreibungen der Unfalltypen sinnvoll, das objektspezifische Relevanz-Attribut zu bestimmen. Die Beschreibungen wurden in der Datenbank entsprechend erweitert.

Das Data Matching wird analog zu dem in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Verfahren durchgeführt. Für jede der Fahrsituationen aus der Datenbank ergeben sich somit Kandidaten an Unfallsituationen zu denen diese Situation führen könnte. Fahrurfälle, an denen das Ego-Fahrzeug allein beteiligt ist, können prinzipiell jeder Situation zugeordnet werden. Solche Unfälle beinhalten beispielsweise das Abkommen von der Fahrbahn oder das Schleudern eines Fahrzeugs, beispielsweise auf Grund von Glätte oder anderen Witterungs- oder Fahrbahnbedingungen. Solche Situationen werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Die Ergebnisse des Data Matching von Fahrsituationen und Unfalltypen sollen auch beispielhaft dargestellt werden. In diesem Fall wurden die Befahrungsdaten der Situationen des Münchener Nordens als Testdatensatz herangezogen, da auch aus diesem Gebiet reale Unfalldaten zur Verfügung stehen. Es wurden 226 Fahrsituationen von Befahrungen aus dem Münchener Norden mit Hilfe des Data Matching Verfahrens klassifiziert und diese Bewertung im Anschluss manuell ausgewertet. In der Abbildung 4.7 sind sowohl Ergebnisse des Data Matchings der Fahrsituationen und Unfalltypen der 226 Testfälle dargestellt, als auch die Unfalltypen der Unfälle des Testgebietes. Die beiden Daten können zwar nicht ohne Weiteres miteinander verglichen werden, trotzdem sind einige Schlüsse aus der Grafik erkennbar.

Die Mehrheit der Konflikte, die in den Testdaten mittels des Data Matching den Situationen zugeordnet werden, gehören zum Typ Unfall im Längsverkehr. Das ist dadurch zu begründen, dass in den meisten der Situationen Fahrzeuge, die in die gleiche Längsrichtung wie das Ego-Fahrzeug fahren, erkannt werden. Ebenso verhält es sich mit Fahrzeugen des ruhenden Verkehrs. Da an den meisten Stellen der Strecken des Testgebietes das Parken parallel zur Straße gestattet ist und auch parkende Fahrzeuge erkannt werden, können stets Konflikte des Unfalltyps „Unfall mit Fahrzeugen des ruhenden Verkehrs“ zugeordnet werden.

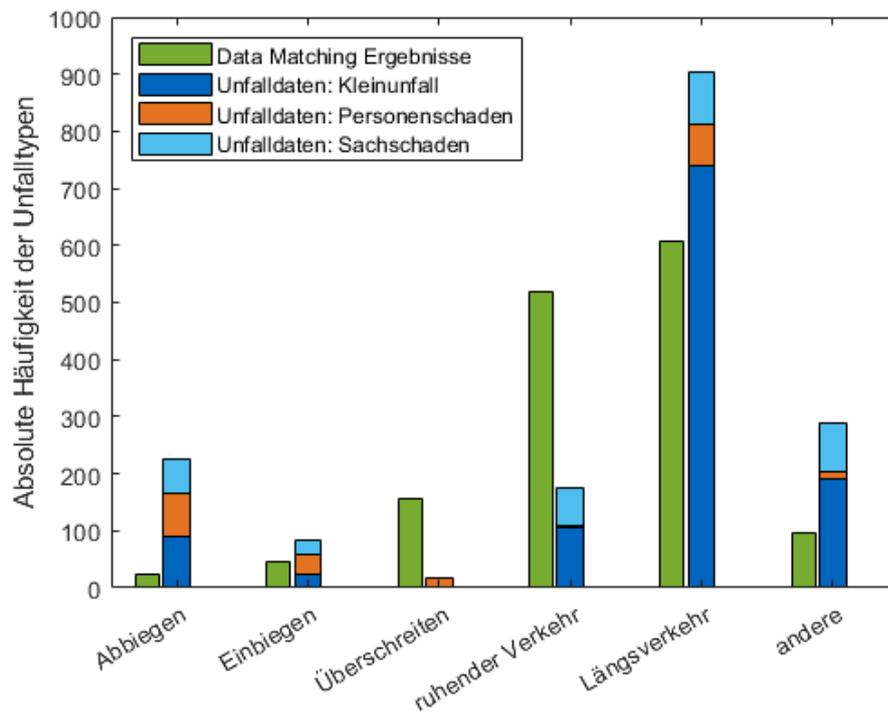


Abbildung 4.7: Ergebnisse der Zuordnungen des Data Matching Verfahrens für Fahrsituationen und Unfalltypen der Testfälle und Gegenüberstellung mit den Unfalltypen der Unfälle des Testgebietes

Betrachtet man die Unfallzahlen aus den realen Unfalldaten in Abbildung 4.7 wird deutlich, dass es relativ häufig zu Unfällen beim Abbiegen gekommen ist. Das Data Matching ordnet jedoch nur sehr wenigen Fahrsituationen Konflikte dieses Unfalltyps zu. Das ist schlicht dadurch zu erklären, dass bei den Befahrungen die Testroute in einer bestimmten Abfolge befahren wurde, dabei waren nur die Abbiegevorgänge an den Knotenpunkten, die die Straßen der Testroute verbinden notwendig, ansonsten wurde geradeaus gefahren. Entsprechend wurde nur selten ein Unfall des Typs Abbiegen als Gefahr in der Fahrsituation identifiziert. Unfälle des Typs „Überschreiten“ wurden hingegen relativ häufig zugeordnet während nur wenige Unfälle dieses Typs tatsächlich auf den Straßen der Untersuchungsroute geschehen sind. In diesem Fall werden allen Situationen, in denen Fußgänger detektiert wurden entsprechend zugeordnet.

Aus der manuellen Bewertung der Ergebnisse des Data Matching wurde erkennbar, dass das Verfahren gut für die in dieser Arbeit angestrebte Zuordnung verwendbar ist. Ähnlich wie in den Zuordnungen von Fahrsituationen und Verkehrsregeln ist allerdings auch in diesem Fall noch eine tiefergehende Betrachtung notwendig. Um das Risiko abzuschätzen, ob ein Unfall tatsächlich aus einer bestimmten Situation entstehen kann, ist es nicht ausreichend lediglich das Vorhandensein gewisser Objekte und deren Attribute zu überprüfen. In einem weiteren Schritt sollte bewertet werden, wie hoch das Risiko tatsächlich ist. Automatisierte Fahrzeuge können dazu genaue Messwerte aus der Sensorik verwenden und beispielsweise Sicher-

heitskenngrößen (vgl. Kapitel 2.2.4) ermitteln. In Kapitel 6 wird ein Vorgehen zu einer Kritikalitätsbewertung von Fahrsituationen vorgestellt, welches unter anderem die realen Unfalldaten nutzt.

4.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wurden konkrete Daten aus Befahrungen in urbanen Gebieten vorgestellt. Diese Daten wurden mit Hilfe der in Kapitel 3 vorgestellten Beschreibungsform in eine Datenbank übertragen. Es wurden über 2 800 Fahrsituationen aus verschiedenen Gebieten aufgenommen und mit Hilfe der Beschreibungsform erfasst. Zusätzlich zu den Fahrdaten wurden Unfalldaten aus einem der Testgebiete, in denen auch Befahrungen stattgefunden haben, analysiert. Hieraus können Unfallschwerpunkte identifiziert werden und Fahrsituationen aufgefunden werden, die in der Vergangenheit häufig zu Unfällen bei menschlichen Fahrern führten.

Wenn Fahrer oder auch automatisierte Fahrsysteme in urbanen Fahrsituationen identifizieren sollen, ob ein konkreter Konflikt vorliegt oder auch welche Verkehrsregeln in einer bestimmten Fahrsituationen gelten, müssen die Fahrsituationen diesen Klassen der Verkehrsregeln und Konflikte zugeordnet werden. In diesem Kapitel wurde dafür das Data Matching Verfahren vorgestellt. Durch die einheitlich verwendete Semantik bei der Beschreibung der Fahrsituationen aus den Befahrungen im Testgebiet, der Unfalltypen sowie der Fahrsituationen, die die Verkehrsregeln repräsentieren, sind die Daten vorbereitet um einander mittels der entwickelten Klassifikation zuzuordnen.

Ein entsprechender Algorithmus für die analysierten Daten wurde entwickelt und zum einen für die Zuordnung von Fahrsituationen zu Verkehrsregeln und zum anderen für die Zuordnung von Fahrsituationen zu Unfalltypen angewendet. Dadurch wurde ermöglicht, dass jeder Fahrsituation Kandidaten an Verkehrsregeln zugeordnet werden können, die in dieser Situation gelten könnten. Des Weiteren können Unfalltypen identifiziert werden, die Unfälle beschreiben, zu denen die Fahrsituation führen könnte und somit Konflikte in der Fahrsituation darstellen.

Die Zuordnung der Daten erfolgt auf dem Abstraktionsgrad der Situationsbeschreibungen, also rein auf Basis des Vorhandenseins bestimmter Voraussetzungen wie Infrastrukturtypen, Verkehrszeichen oder anderen Objekten, die in einer Szene, inklusive weiterer Eigenschaften, identifiziert wurden. Dadurch sind auch bis zum Ende des Zuordnungsverfahrens häufig noch mehrere Kandidaten an Verkehrsregeln bzw. Unfalltypen für eine Fahrsituation vorhanden. Zum einen wurde in diesem Fall die Entscheidung getroffen, die Beschreibungen der Daten nicht so weit zu erweitern, dass alle unklaren Fälle (wie beispielsweise Verkehrsregeln die dadurch bestimmt werden, dass bestimmte Objekte nicht vorhanden sind) identifiziert werden. Des Weiteren bedarf es, um zu einer finalen Entscheidung zu kommen, welche Verkehrsregel beispielsweise in einem bestimmten Fall gilt, häufig näherer Informationen zu den Objekten insbesondere zu deren Dynamik. Dies soll jedoch nicht über die Beschreibung der Fahrsitua-

tion geschehen, sondern nachgelagert stattfinden. Für die Entscheidungsfindung für das regelkonforme Verhalten eines automatisierten Fahrsystems wird in dieser Arbeit der Einsatz von Fuzzylogik vorgeschlagen, die in Kapitel 5 vorgestellt wird.

Zusätzlich ist es, insbesondere bei den bestehen von Konflikten, nicht ausreichend, lediglich zu identifizieren, welche Unfalltypen aus einer Fahrsituation entstehen können, auch die Bewertung der Kritikalität unter Berücksichtigung weiterer Kriterien, ist von Bedeutung. Hierfür wird im Kapitel 6 ein Bewertungsschema vorgeschlagen.

5. Entscheidungsfindung für regelkonformes Fahrverhalten

Innerhalb der entwickelten Datenbank werden Fahrsituationen, Verhaltensregeln und Unfallsituationen beschrieben. Die Daten sollen der Entwicklung und Absicherung des automatisierten Fahrens für den städtischen Verkehr dienen. Hierbei soll insbesondere die Situationsanalyse und eine darauf aufbauende Entscheidungsfindung bei der Wahl der Fahrstrategie auf der taktischen Ebene unterstützt werden. Das heißt, dass für jede beliebige Fahrsituation, die im Realverkehr erfasst wird, eine entsprechende Verhaltensregel identifiziert werden soll, wonach das Fahrzeug handeln kann. So kann überprüft werden, ob sich die Fahrzeuge auch in besonderen Situationen entsprechend der geltenden Regeln verhalten können, ähnlich wie im Führerschein bei menschlichen Fahrern.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methodik sieht zwei Schritte vor, um ein regelkonformes Fahrverhalten für die jeweilige Fahrsituation zu identifizieren. Zunächst wurde, wie im Kapitel 4.2 vorgestellt, mit Hilfe des Data Matching aus der großen Anzahl an möglichen Verhaltensregeln und Gefahrensituationen eine Liste an Kandidaten für die betrachtete Situation identifiziert. Im zweiten Schritt muss dann eine Fahrstrategie nach geltenden Verkehrsregeln gefunden werden. Dafür werden die Verhaltensregeln betrachtet, die aus der StVO und dem Fragebogenkatalog identifiziert wurden. Darin sind spezifischere, jedoch immer noch unkonkrete Verhaltensanweisungen und Situationsbeschreibungen enthalten. Dem Problem der Unschärfe in linguistischen Beschreibungen nimmt sich die Fuzzylogik an. Sie wird deshalb dazu verwendet, aus den Beschreibungen konkrete Anweisungen für das automatisierte Fahrzeug zu extrahieren. Das Vorgehen wird im Folgenden näher erläutert. Dabei wird zunächst in Kapitel 5.1 auf die Grundlagen der Fuzzylogik eingegangen und dann eine Anwendung auf das Problem der Verkehrsregeln in Kapitel 5.2 umgesetzt.

5.1 Grundlagen der Fuzzylogik

Wenn komplexe Systeme analysiert werden sollen, werden häufig mathematisch komplexe Ansätze verwendet, um Mechanismen und Funktionsweisen zu modellieren. Im automatisierten Fahren beispielsweise, werden die möglichen Trajektorien eines Fahrzeugs häufig als Polynome errechnet. Auch die dynamischen Bewegungen eines Fahrzeugs können mit mathematischen Modellen sehr genau quantifiziert werden. Insbesondere bei der Betrachtung von humanen Systemen ist jedoch eine solche quantitative Betrachtung häufig nicht zielführend. Eine alternative Vorgehensweise wird mit der Einführung der Fuzzylogik von ZADEH [1973] vorgeschlagen. Die Fuzzylogik befasst sich mit der Entscheidungsfindung auf Basis von unpräzisen Informationen. Begründet wird insbesondere, dass Kernelemente des menschlichen Denkens nicht Zahlen, sondern vage, unscharf definierte Mengen sind. So wird als „Prinzip der Unvereinbarkeit“ bezeichnet, dass bei steigender Komplexität eines Systems, die Möglichkeit, präzise und dennoch bedeutsame Aussagen über dessen Verhalten zu tätigen, sinkt. Ab

einem gewissen Punkt können sich Präzision und Bedeutsamkeit gar gegenseitig ausschließen. In der menschlichen Logik ist vielleicht gerade der Aspekt, dass Mengen an Informationen zusammengefasst werden können, vorteilhaft. Häufig ist für Entscheidungen und die Erfüllung von Aufgaben keine sehr große Präzision nötig. Wichtiger ist es für den Menschen, aus der großen Menge an Informationen die relevanten herauszufinden und einzuordnen. [ZADEH 1973]

Basis zur Anwendung der Fuzzylogik ist die Verwendung von unscharfen Mengen, welche linguistische Variablen besser beschreiben können als klassische Mengen. Dabei muss ein Wert nicht immer scharf einer Menge zugeordnet werden, sondern kann mehreren Mengen unterschiedlich stark zugehören. Diese Mengen, sog. *Fuzzy Sets*, werden im folgenden Abschnitt 5.1.1 näher betrachtet. Zunächst wird genauer darauf eingegangen, was der Unterschied zu klassischen Mengen ist, dann wird beschrieben, wie präzise Größen einer unscharfen Menge durch die sog. *Fuzzifizierung* zugeordnet werden. In Entscheidungsregeln werden häufig mehrere Mengen miteinander kombiniert und logisch verknüpft. Solche „wenn – dann“ Formulierungen können auch für die Verkehrsregeln abgeleitet werden. Auf Basis dieser Regeln, welche die zuvor definierten Fuzzy Sets verwenden, sollen Entscheidungen getroffen werden. Das geschieht in einem sog. *Inferenzsystem*. Auf die Fuzzy Regeln und Inferenzsysteme wird im Abschnitt 5.1.2 eingegangen. Die Ausgabe des Inferenzsystems ist jedoch wieder eine unscharfe, und damit für Maschinen nicht verständliche Menge. Im Schritt der *Defuzzifizierung* wird diese wieder in einen konkreten Wert übersetzt.

Die Abbildung 5.1 gibt das Vorgehen im Gesamten wieder. Die einzelnen Teile werden in den nächsten Unterkapiteln in der Theorie näher erläutert und dann auf die Entscheidungsfindung für das Ableiten der korrekten Verhaltensweisen auf Grund der Verkehrsregeln in Fahrsituationen angewendet.

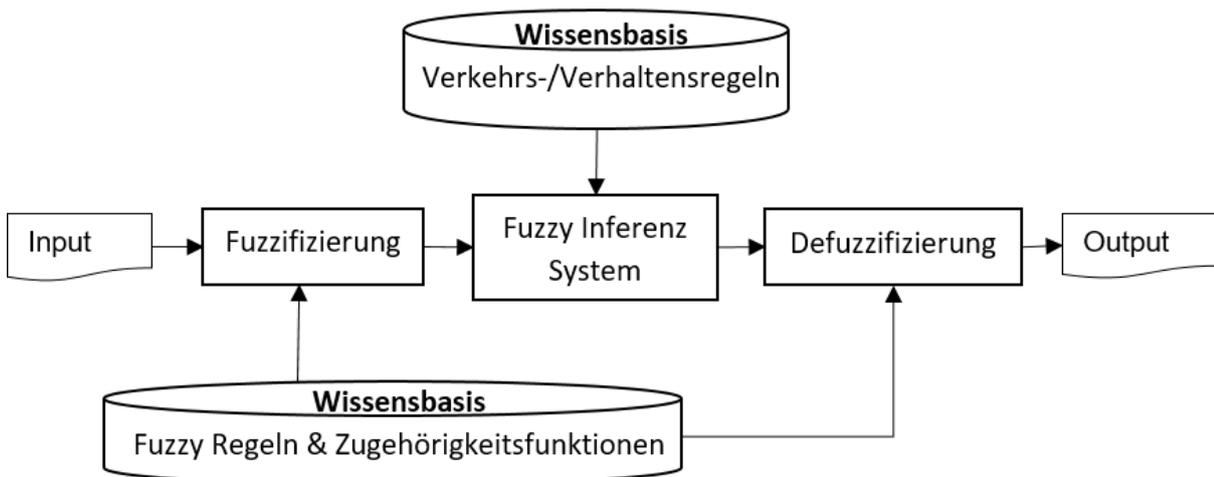


Abbildung 5.1: Aufbau eines Fuzzy-Systems

5.1.1 Die Theorie unscharfer Mengen

Im Sprachgebrauch werden häufig beschreibende Begriffe wie beispielsweise *schnell* oder *langsam*; *groß* oder *klein* verwendet, die nur vage Informationen beinhalten. Solch unpräzise Angaben können von Menschen verstanden werden ohne genauer spezifiziert zu werden. Zwar können verschiedene Personen diesen Begriffen je nach Kontext unterschiedliche Werte zuordnen, wodurch es auch zu Missverständnissen kommen kann, dennoch ist es in der menschlichen Kommunikation meist zielführender als konkrete Werte zu verwenden, da Menschen sehr präzise Angaben oftmals gar nicht wahrnehmen können. Das Beispiel der Geschwindigkeitsangaben macht dies deutlich. Im Gespräch zwischen Menschen kann meist ein Konsens über *schnelle* und *langsame* Fahrzeuge gefunden werden, sehr präzise Werte sind jedoch vom Menschen nicht wahrnehmbar und geringe Differenzen kaum unterscheidbar. Für Menschen formulierte Regeln und Handlungsanweisungen beinhalten aus diesen Gründen oftmals abstrahierte Informationen. Eine Entscheidungsfindung ist auf dieser Basis trotz dessen möglich.

Zusätzlich machen sogenannte Heckenbegriffe wie *ziemlich*, *sehr* oder *relativ* in Bezug auf diese Angaben deutlich, dass es Werte gibt, die nicht eindeutig zu einer Gruppe gehören. Ein als *relativ hohe* Geschwindigkeit bezeichneter Wert ist nicht eindeutig der Gruppe der hohen Geschwindigkeiten zuordenbar. Andere Personen würden den Wert evtl. als mittlere Geschwindigkeit begreifen. Müssten konkrete Geschwindigkeitswerte immer nur jeweils einer Menge zugeordnet werden, bestünde eine hohe Unsicherheit.

Die Fuzzylogik widmet sich diesem Problem der Unsicherheit und arbeitet mit vagen linguistischen Variablen. Dabei werden unscharfe Mengen definiert, die in der Arbeit von ZADEH [1965] als *Fuzzy Sets* eingeführt wurden. Eine unscharfe Menge wird durch eine Zugehörigkeitsfunktion charakterisiert, welche jedem Wert einen Zugehörigkeitsgrad zwischen Null und Eins, mit der dieser Wert zu der betrachteten Menge gehört, zuweist. Das heißt, dass ein Wert mehreren Mengen gleichzeitig zugeordnet sein kann, und zwar jeweils zu einem gewissen Grad.

Ein Beispiel einer Fuzzyfunktion mit mehreren Zugehörigkeitsfunktionen ist in der Abbildung 5.2 für das Beispiel der Geschwindigkeit dargestellt. Die Form und Anzahl der Funktionen ist dabei nicht vorgegeben und kann je nach Anwendungsfall definiert werden. Das Beispiel zeigt die Geschwindigkeit auf der Abszisse und deren Zugehörigkeiten zu den einzelnen Mengen von Null bis Eins auf der Ordinate. Es wird deutlich, dass ein Punkt auf der Abszisse, also ein Geschwindigkeitswert, zu mehreren Mengen gehören kann. In der Grafik ist solch ein Beispiel mit einer Linie markiert. Dieser Wert würde zu einem geringen Grad zur Menge der mittleren Geschwindigkeiten und zu einem hohen Grad zu den geringen Geschwindigkeiten gehören. Er gehört jedoch nicht zur Menge der hohen Geschwindigkeiten.

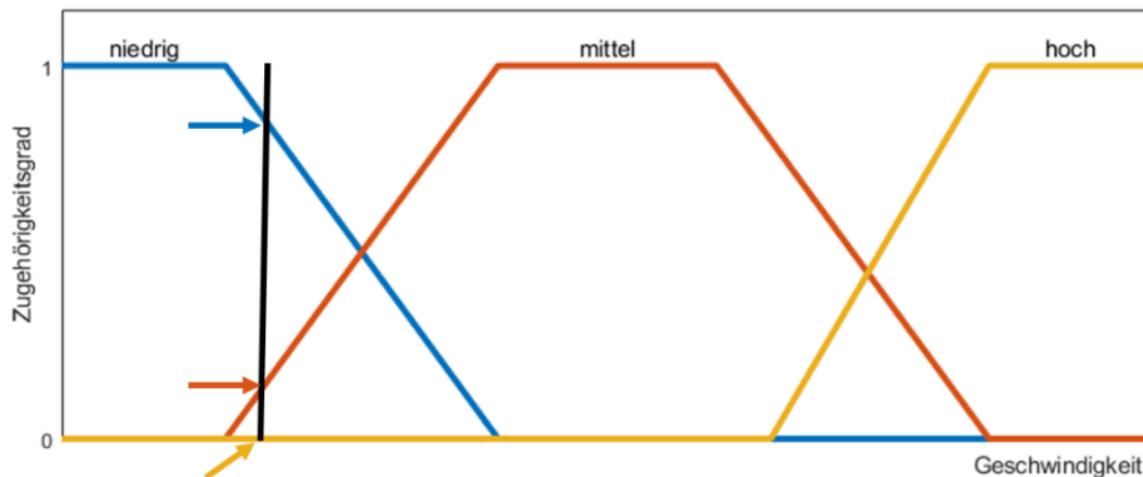


Abbildung 5.2: Beispielhafte Zugehörigkeitsfunktionen für Geschwindigkeiten zu den Fuzzy Sets niedrige, mittlere und hohe Geschwindigkeit

Im Unterschied zum menschlichen Verständnis für unscharfe Mengen und der Fähigkeit, aus unpräzisen Informationen Entscheidungen abzuleiten, benötigen Maschinen konkrete Werte, um Handlungen umzusetzen und Messen auch konkrete Werte als Eingangsgrößen. Das Zuordnen eines präzisen Wertes zu einem Fuzzy Set geschieht durch die *Fuzzifizierung*. Dafür sind einige Eigenschaften der Mengenlehre und der Übertragung dieser auf unscharfe Mengen nötig. Diese werden im Folgenden definiert.

Ein Fuzzy Set A wird durch eine Zugehörigkeitsfunktion der Form $f_A(x)$ dargestellt, die jedem Element x eine Zugehörigkeit im Intervall $[0,1]$ zuweist. Dieser Zugehörigkeitswert wird mit $\mu(x)$ bezeichnet. Für jeden Wert x kann mit dieser Funktion errechnet werden, zu welchem Grad der Wert zu der unscharfen Menge A gehört. Diese Eigenschaft ist der Vorteil gegenüber der klassischen Mengenlehre, in der ein Wert nur entweder zu einer Menge gehören kann (1) oder nicht (0). Bei Verwendung unscharfer Mengen kann die Zugehörigkeit jeden Wert zwischen Null und Eins annehmen. [ZADEH 1965]

Außerdem ist die Zugehörigkeit von der Wahrscheinlichkeit abzugrenzen, denn die Summe aller Zugehörigkeiten von x , also $\sum \mu(x)$ muss nicht 1 ergeben, wie es in der Wahrscheinlichkeit der Fall wäre. Der Zugehörigkeitswert darf somit nicht als Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert zu der Menge gehört, interpretiert werden. [MICHELS ET AL. 2002]

Zur Bestimmung der Zugehörigkeitsfunktionen gibt es kein definiertes Vorgehen. In den meisten Anwendungsfällen werden eher einfache Funktionsformen verwendet. Die Form und Werte werden meist über Expertenmeinungen bestimmt und sollen ein möglichst gutes Abbild der subjektiven Vorstellung sein. [ROMMELFANGER 2013, S. 10]

Fuzzylogik bedient sich der klassischen Mengenlehre, in der folgende Mengen und Verknüpfungen definiert sind:

Eine Menge A ist Teilmenge einer Menge B , wenn für die Elemente x in A gilt, dass sie Teil beider Mengen sind. Dies wird mit der Symbolik $A \subseteq B$ ausgedrückt. Ist eine Menge A leer, so wird dies mit $A = \emptyset$ beschrieben. Werden Elemente bezeichnet, die NICHT in der Menge A sind, wird dies durch die Schreibweise $\neg A$ ausgedrückt.

Von einer Disjunktion oder Vereinigungsmenge spricht man, wenn zwei Mengen mit dem logischen ODER miteinander verknüpft werden können. Die logische Verknüpfung für eine Vereinigung der Mengen A und B wird durch $A \cup B$ beschrieben.

Die Schnittmenge zweier Mengen entspricht dem logischen UND. In der Schnittmenge aus A und B sind Elemente, die sowohl Teil der Menge A als auch der Menge B sind. Ausgedrückt wird dies durch die Symbolik $A \cap B$.

Von einer Differenz zwischen zwei Mengen A und B spricht man bei den Elementen, die Teil der Menge A aber nicht der Menge B sind. Dies wird mit $A \setminus B$ symbolisiert und auch als Komplement von B bezogen auf die Menge A bezeichnet.

In der klassischen Logik, in der Elemente nur entweder zu einer Menge gehören können oder nicht (daher auch zweiwertige oder boolesche Logik), liefert die Funktion mit logischen Operatoren auch einen Wahrheitswert, also wahr (1) oder falsch (0). In der Fuzzylogik ist dies nicht der Fall. In ZADEH [1965] wird beschrieben, welche logischen Operationen mit Fuzzy Sets möglich sind. Die drei Operatoren AND, OR und NOT werden für das Arbeiten mit Fuzzylogik verwendet. In Abbildung 5.3 sind die Unterschiede zwischen der zweiwertigen und der mehrwertigen Logik dargestellt. Im Folgenden werden die Berechnungsvorschriften für die mehrwertige Fuzzylogik definiert.

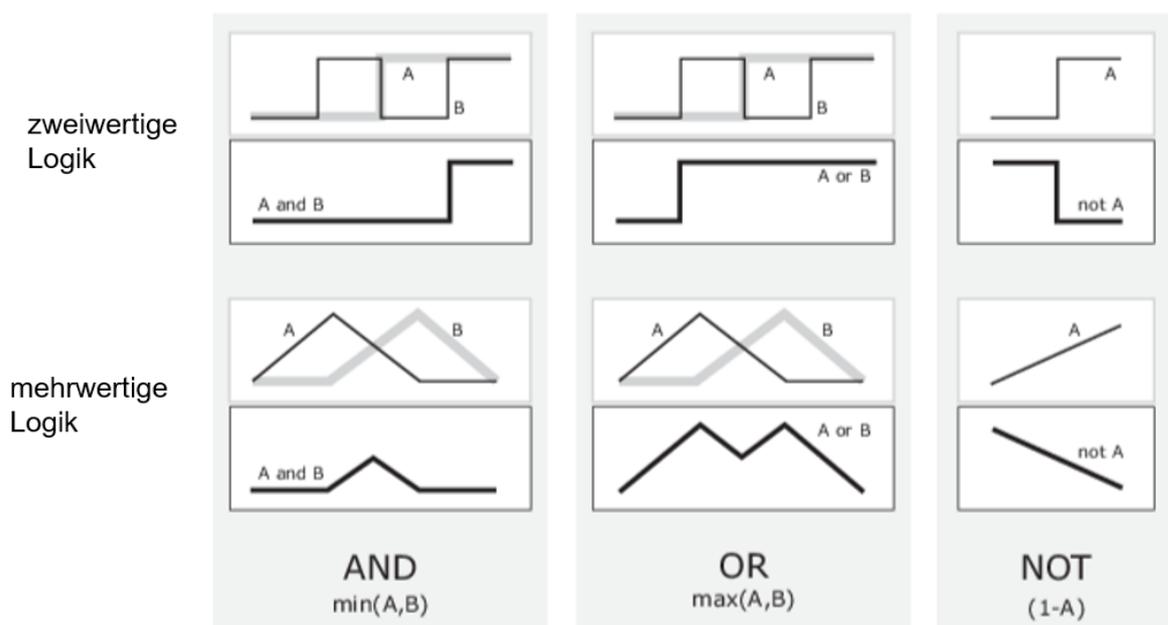


Abbildung 5.3: logische Operatoren im Vergleich zwischen der klassischen zweiwertigen Logik und der mehrwertigen Fuzzylogik aus [MATHWORKS INC. 2020]

Die Vereinigungsmenge zweier Fuzzy Sets A und B ist

$$A \cup B = A \text{ OR } B = \max(f_A(x), f_B(x))$$

Die Schnittmenge zweier Fuzzy Sets A und B ist

$$A \cap B = A \text{ AND } B = \min(f_A(x), f_B(x))$$

Das Komplement $f_{A'}$ ist

$$\neg A = 1 - A = 1 - f_A(x)$$

Außerdem können mathematische Operationen wie die folgenden durchgeführt werden:

Produkt zweier Mengen:

$$A * B = f_{AB} = f_A f_B$$

Die Summe zweier Mengen:

$$A + B = f_{A+B} = f_A + f_B$$

Die absolute Differenz:

$$|A - B| = f_{|A-B|} = |f_A - f_B|$$

Die Kritiken an der Fuzzylogik beziehen sich auf solche Inferenzen. In der Fuzzylogik ist es möglich, dass Elemente auch teilweise zu einer Menge gehören und somit nicht nur die Werte wahr (1) oder falsch (0) möglich sind. Somit kann die Antwort auf die Frage „Gehört Element x zur Menge A ?“ durch ablesen des Zugehörigkeitswertes in der Zugehörigkeitsfunktion mit beispielsweise $\frac{1}{2}$ beantwortet werden. [HEALD 2018] Dadurch wird jedoch dem Grundsatz widersprochen, dass sich logische Aussagen nicht widersprechen dürfen, da es nun eine Schnittmenge von A und $\neg A$ gibt, die in diesem Beispiel $\frac{1}{2}$ ist. Dies ist ein logischer Widerspruch, der Kern der Kritik an der Fuzzylogik ist [SAUERLAND 2010].

5.1.2 Fuzzy Regeln und Inferenzsysteme

Mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen werden die von der Maschine konkret gemessenen Werte einer unscharfen Menge zugeordnet. Auf dieser Basis werden dann die Entscheidungsregeln angewandt. Die Entscheidungsregeln verknüpfen die unscharfen Mengen logisch und leiten eine Handlungsentscheidung ab, die wiederum unscharf sein kann. Ein Beispiel hierfür wäre das folgende:

WENN der Abstand des Vorderfahrzeugs sehr gering ist ODER die Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug groß ist, DANN bremsen stark ab.

In diesem Beispiel werden zwei unscharfe Mengen logisch durch den Operator ODER miteinander verknüpft und auch die Folgerung ist wiederum unscharf. Ein automatisiertes Fahrzeug kann mit Hilfe der Sensoren nur konkrete Werte messen und muss wiederum konkrete Werte an die Aktuatoren weitergeben, um eine Handlung umzusetzen. Die Entscheidungsfindung unter Nutzung der Fuzzylogik geschieht in einem Inferenzsystem, in der auf Basis der Regeln und Zugehörigkeiten eine unscharfe Entscheidung abgeleitet wird und wiederum in einen konkreten Wert übersetzt wird.

Das Inferenzsystem wandelt die Eingangsdaten unter Zuhilfenahme der Regelbasis in eine Ausgabegröße um. Dies geschieht in fünf Schritten, die in Abbildung 5.4 dargestellt sind. Um einen konkreten Ausgabewert zu bestimmen, gibt es meist mehrere Regeln, im Beispiel sind drei Regeln dargestellt. Es werden in diesem Beispiel zwei Eingabegrößen benötigt, die konkret gemessen werden und im ersten Schritt den unscharfen Mengen, unter Zuhilfenahme der zuvor definierten Funktionen, einem Zugehörigkeitsgrad zugeordnet werden. Im zweiten Schritt werden die logischen Operationen angewendet. Im Beispiel werden ODER-Operatoren verwendet. Obwohl auch andere Methoden existieren, wird in der Fuzzylogik für das Verknüpfen zweier Mengen mit dem logischen ODER die Maximum-Funktionen angewendet. Schritt 3 beinhaltet die Implikation, bei der geschlossen wird, zu welchem Grad die Folgerung der Regeln jeweils zutrifft. Auch hierfür gibt es verschiedene Methoden. Im Beispiel ist die Minimum-Methode angewendet, bei der die Ausgabe-Funktion an der entsprechenden Stelle abgeschnitten wird. Da sich mehrere Regeln auf die gleiche Ausgabe beziehen und alle zunächst einzeln bewertet werden, müssen die Ergebnisse nun miteinander kombiniert werden.

Alle ermittelten Ausgabefunktionen werden im Schritt 4 zu einer Funktion aggregiert. Für jede Ausgabevariable wird eine Fuzzymenge als Ausgabe ermittelt. Dabei müssen die aus der Implikation resultierenden Mengen kombiniert werden. In Abbildung 5.4 wird die Maximum-Methode (*max*) verwendet, um die Ausgabewerte zu aggregieren. Die Funktion der Output Zugehörigkeit bildet dabei jeweils das Maximum der einzelnen, durch die Regeln ermittelten Zugehörigkeiten ab. Es bestehen jedoch auch andere Aggregationsmethoden. Mit *probor* wird das probabilistische ODER bezeichnet, wobei die Aggregation zweier Mengen *a* und *b* durch die Funktion $y = a + b - ab$ dargestellt wird. Des Weiteren können die einzelnen Funktionen, die sich aus der Implikation ergeben, aufsummiert (bezeichnet mit *sum*) werden.

Schließlich soll in Schritt 5 aus dieser Fuzzyfunktion ein konkreter Wert extrahiert werden, den eine Maschine zur Regelung verwenden kann. Der Prozess der Defuzzifizierung sorgt dafür, dass sich als Ausgabe wieder ein konkreter Wert ergibt. Der Wert wird in der durch die Aggregation bestimmten Menge gesucht und muss innerhalb der Grenzen der ermittelten Fuzzyfunktion liegen. Die häufigste der verschiedenen Methoden ist die Berechnung des geometrischen Schwerpunktes (*centroid*) der Fläche unter der durch die Aggregation ermittelten Kurve. Diese Methode wird auch im Beispiel in Abbildung 5.4 verwendet. Es gibt eine Reihe weiterer Methoden zur Defuzzifizierung. Nennenswert sind beispielsweise die sog. *bisector* Methode, wobei die Stelle gesucht wird, an der die Fläche unterhalb der Kurve in zwei gleiche Teile aufteilt. Mit *MOM* wird die Methode *middle of maximum* oder *mean of maximum* bezeichnet. Dabei

wird der Mittelwert der Werte identifiziert, für die das Ausgabe Fuzzy Set am größten ist. Bei *LOM* (*largest oder last of maximum*) wird demgegenüber der letzte oder größte Wert dieser Menge verwendet und bei *SOM* (*smallest of maximum*) der kleinste. Diese Methoden sind jedoch nur sinnvoll anwendbar, wenn die Werte der x-Achse entsprechend definiert sind.

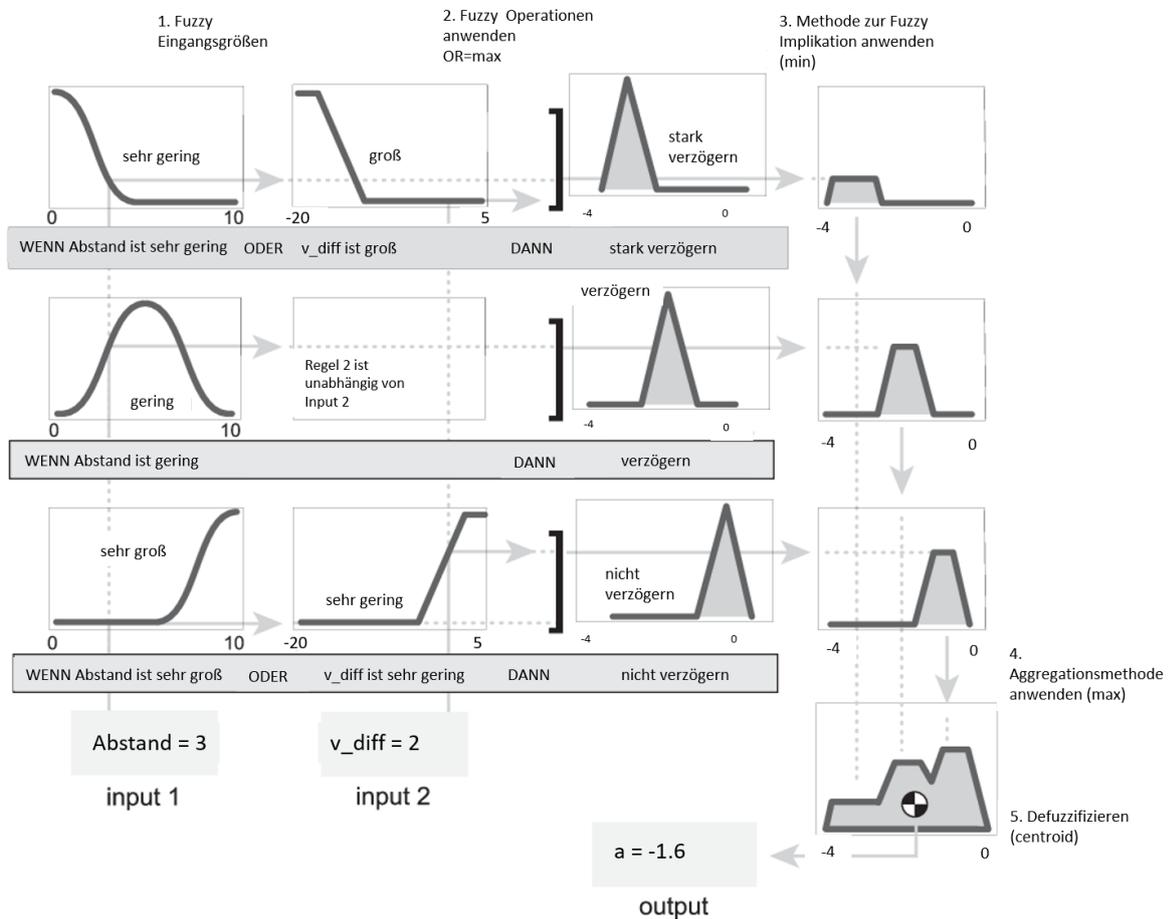


Abbildung 5.4: Beispiel eines Fuzzy Inferenzsystems mit drei Regeln, angepasst nach [MATHWORKS INC. 2020]

Das zuvor beschriebene Fuzzy Inferenzsystem wird auch als Mamdani Inferenz bezeichnet, da es auf den Arbeiten von MAMDANI UND ASSILIAN [1975] beruht. Als weiteres Inferenzsystem ist das von TAKAGI UND SUGENO [1985] nennenswert. Dabei liefert die logische Operation mit den Eingabewerten jeweils einelementige Mengen als Ausgabe für jede Regel. Für die Implikation wird die Produkt-Methode verwendet und zur Aggregation der Outputs die Summation. Um den Ausgabewert für die Entscheidung zu ermitteln, wird der gewichtete Mittelwert über alle Ausgaben berechnet. [MATHWORKS INC. 2020]

Es existieren eine Reihe erfolgreicher Anwendungen solcher Systeme als Regler technischer Systeme [PFEIFFER ET AL. 2002a]. Etliche Anwendungen sind auch in Verkehrswesen zu finden [TEODOROVIĆ 1999], beispielsweise in der Steuerung von Lichtsignalanlagen [BELL ET AL. 1996], [SAYERS 1995], in der automatischen Störungserkennung [BUSCH UND GHIO 1994],

[BUSCH ET AL. 1994] und der Zuflussregelung für Autobahnen [BOGENBERGER 2001]. Außerdem wurden etliche Erweiterungen entwickelt. Durch das Adaptive Neuro Fuzzy Inferenzsystem (ANFIS), zum Beispiel, werden neuronale Netze mit der Fuzzylogik kombiniert. Somit kann ein neuronales Netz aufgebaut, welches die Inputdaten (Features) nicht in die Werte 0 oder 1 übersetzt, sondern in Fuzzy Werte, die auch zwischen Null und Eins liegen können. Als ein Anwendungsfall wurde in PANDEY ET AL. [2019] vorgestellt, wie ein ANFIS für die Navigation eines Roboters verwendet wurde, welcher damit erfolgreich um Hindernisse herum navigieren konnte. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass der Regler lernen kann und somit geeignete Parameter für die Zugehörigkeitsfunktionen finden kann.

Fuzzy Systeme werden in verschiedenen Domänen angewendet, in PFEIFER ET AL. (2002a und 2002b) werden einige erfolgreiche Anwendungen vorgestellt. Dabei wird auch deutlich, dass die Verwendungsweise sehr unterschiedlich sein kann. In einigen Anwendungsfällen werden Systeme direkt auf Basis der Fuzzylogik geregelt. Es gibt aber auch Systeme, in denen die Fuzzylogik nur als Zwischenschritt verwendet wird. Das Fuzzy System soll häufig, wie auch in diesem Fall, nicht unbedingt wie ein Regler funktionieren und direkt in das System eingreifen, sondern als Entscheidungshilfe. Es ist in diesem Fall ein unterstützendes System im englischen als Decision Support System (DSS) bezeichnet [PFEIFFER ET AL. 2002a]. In Abbildung 5.5 werden verschiedene Prinzipien dargestellt. Das Expertensystem verwendet Daten, die auch in den Regler eingehen, liefert jedoch lediglich einen Vorschlag für das Verhalten. Fuzzy Systeme können auch dazu verwendet werden, um in einem separaten Prozess Entscheidungen über Parameteradaptionen eines Reglers zu treffen. Es gibt aber auch erfolgreiche Anwendungen, in denen das Fuzzy System direkt als Regler verwendet wird.

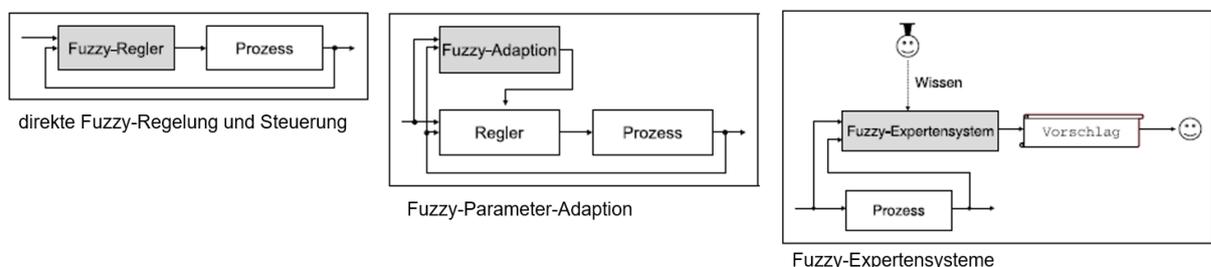


Abbildung 5.5: Prinzip-Schemata zu verschiedenen Anwendungen von Fuzzy Systemen aus [PFEIFFER ET AL. 2002a], [PFEIFFER ET AL. 2002b]

In der Regelung eines automatisierten Fahrzeugs sind Fuzzy Systeme nicht immer zielführend oder notwendig, da beispielsweise genauere Daten vorhanden sind und ein mathematisches Modell für die Regelung angewandt werden kann. So funktionieren ACC-Regler beispielsweise sehr gut mit der Verwendung von konkreten Zeitlückenwerten. Für die Auswertung von Verkehrsregeln erscheint solch eine Anwendung jedoch sinnvoll und wird in dieser Arbeit vorgeschlagen, da in vielen Fällen, wie in Kapitel 2.2.2 vorgestellt, in den Verkehrsregeln unscharfe Formulierungen verwendet werden. Der Fokus der Arbeit liegt bei der Fahrstrategie und Manöverplanung. Dabei liefert das Inferenzsystem eine Strategie, wie beispielsweise, ob in einer Fahrsituation an einem Fahrzeug vorbeigefahren soll oder hinter dem Fahrzeug gehalten wer-

den soll. Auf welcher konkreten Trajektorie, kann jedoch in der Trajektorienplanung geschehen. Das System wird also als Teil der in Kapitel 2.3.3 erläuterten Fahrstrategie, in der auch taktische Entscheidungen getroffen werden, vorgeschlagen. Die in dieser Arbeit durchgeführte Umsetzung wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

5.2 Anwendung der Fuzzylogik zur Entscheidungsfindung bei der Auswahl einer Fahrstrategie

Das Data Matching war dabei behilflich, auf Basis von in der Situation vorhandenen Komponenten, wie Objekten oder anderen Eigenschaften der Situationsbeschreibung, die in der jeweiligen Situation möglicherweise geltenden Verkehrsregeln ausfindig zu machen. Nachdem die Verkehrsregeln bekannt sind, ist auch die jeweilige Lösung, also das in der Situation angemessene Fahrverhalten für das Fahrzeug definiert. Nun muss eine Entscheidung getroffen werden, welche Fahrstrategie das automatisierte Fahrzeug in der Situation wählen soll. Die Verkehrsregeln geben Anweisungen darüber, welches Verhalten der Fahrer in den verschiedenen Fahrsituationen im öffentlichen Straßenverkehr gefordert ist oder was verboten ist. Die Fragen aus dem Katalog zur theoretischen Führerscheinprüfung geben über die korrekten Antworten auch jeweils eine Lösung für das korrekte Verhalten in den Situationen vor. Teilweise werden auch nur Hinweise gegeben, beispielsweise darüber, was in einer Situation besonders beachtet werden muss. Oftmals sind jedoch einzelne Attribute der Situationsbeschreibung, wie Geschwindigkeiten oder Abstände, genauer zu spezifizieren. Beispiele dafür wurden in Kapitel 4.2.2 genannt.

Die Verkehrsregeln sind beabsichtigt generisch formuliert, sodass nicht alle möglichen Situationen, in der eine Regel gilt, vordefiniert werden müssen. Beim Führen eines Fahrzeugs soll auf bestehendes Wissen zurückgegriffen werden und Analogien zwischen Situationen gefunden werden, worauf aufbauend auch unbekannte Situationen gelöst werden können. Werden generische Formulierungen verwendet und ist Interpretation nötig, kann dies für automatisierte Systeme, die mit präzisen Eingaben arbeiten, ein Problem darstellen. Die zuvor vorgestellte Fuzzylogik nimmt sich diesem Problem an. Im Folgenden wird beschrieben, wie die Fuzzylogik bei der Entscheidungsfindung zur Wahl einer Fahrstrategie eines automatisierten Fahrzeugs verwendet werden kann.

5.2.1 Definition unscharfer Mengen aus Verkehrsregeln

Um Entscheidungen auf Basis der vorgegebenen Regeln und Verhaltensnormen der Straßenverkehrsordnung mit Fuzzylogik treffen zu können, müssen die dafür benötigten unscharfen Mengen (Fuzzy Sets), definiert werden. Es wurden die Beschreibungen aus den Testfragen und Regeln extrahiert, welche Aussagen über die Voraussetzungen und die Verhaltensregeln beinhalten. In der Datenbank sind bereits die Elemente in den Situationsbeschreibungen vorhanden, welche unter anderem Objekte, deren Positionen und andere Eigenschaften beinhalten. Diese Aspekte werden durch das Data Matching der konkreten Fahrsituation zugeordnet.

Die Voraussetzungen werden um die Attribute erweitert, die sprachlich beschrieben werden und nicht präzise sind, das sind meist dynamische Eigenschaften der Objekte. Größtenteils können hierfür die Antworten auf die Fragen des Fragenkataloges zum Führerscheintest verwendet werden, aber auch die Verkehrsregeln der StVO oder deren Interpretationen die der jeweiligen Frage zu Grunde liegen.

Im Folgenden wird ein Beispiel vorgestellt, wie aus einer der Fragen des Fragenkatalogs zur theoretischen Führerscheinprüfung extrahiert wird, welche Mengendefinitionen benötigt werden und wie diese zu Regeln kombiniert werden.

Eine Frage des Fragebogenkataloges lautet: „*Sie möchten an einem Linienbus vorbeifahren, der an einer Haltestelle angehalten hat. Was müssen Sie beachten?*“

Die Antwortmöglichkeiten sind die Folgenden: *Ich muss...*

- *vorsichtig vorbeifahren*
- *den Gegenverkehr beachten*
- *mit ausreichend Sicherheitsabstand vorbeifahren*

Alle Antwortmöglichkeiten sind in dieser Beispielfrage korrekt. Es finden sich auch einige unscharfen Mengen, welche die Fahrer in der Situation interpretieren müssen. Die Begriffe *vorsichtig* und *ausreichend* müssen situationsangepasst sein und werden nicht konkret definiert. Die entsprechende Regel der StVO findet sich in §20 (1) zu Öffentlichen Verkehrsmitteln und Schulbussen und lautet: „*An Omnibussen des Linienverkehrs, an Straßenbahnen und an gekennzeichneten Schulbussen, die an Haltestellen (Zeichen 224) halten, darf, auch im Gegenverkehr, nur vorsichtig vorbeigefahren werden.*“ Weiterhin ist der § 2 zum Vorbeifahren relevant, in dem auf den Gegenverkehr verwiesen wird: „*Wer an einer Fahrbahnverengung, einem Hindernis auf der Fahrbahn oder einem haltenden Fahrzeug links vorbeifahren will, muss entgegenkommende Fahrzeuge durchfahren lassen.*“ [BUNDESMINISTERIUMS DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ] Nicht eindeutig ist, ob sich das Wort *vorsichtig* auf die Geschwindigkeit bezieht oder auf die erhöhte Aufmerksamkeit und Bremsbereitschaft des Fahrers. In Satz (4) wird auf die Geschwindigkeit konkret Bezug genommen, wobei in diesem Fall gilt: an Bussen, die an Haltestellen halten und „*Warnblinklicht eingeschaltet haben, darf nur mit Schrittgeschwindigkeit und nur in einem solchen Abstand vorbeigefahren werden, dass eine Gefährdung von Fahrgästen ausgeschlossen ist.*“

In Rahmen dieser Arbeit wurden die Fragen aus dem Fragenkatalog des theoretischen Führerscheintests aus dem Jahr 2019 analysiert. Dabei wurden die Situationen in einer Datenbank analog zu den Fahrsituationen aus den Testfahrten und den Unfallsituationen beschrieben. Zusätzlich zu den Situationsbeschreibungen, welche die Objekte und Infrastruktur beinhalten, werden die Handlungsanweisungen, welche aus den korrekten Antworten der Fragen resultieren, definiert. Dafür wurden weitere Datenbankeinträge definiert. In diesen Einträgen finden sich nun also die linguistischen Variablen, die unscharfen Mengen beschreiben. Sie sind für zweierlei relevant: Sie können entweder eine Situation definieren, also eine Voraussetzung sein, oder aber eine Aufgabe für das Ego-Fahrzeug beschreiben. Als Fahraufgabe werden sie

dem Ego-Fahrzeug, aus dessen Perspektive die Situation aufgenommen wird, zugeordnet. Handelt es sich um eine Voraussetzung, so können Sie den unterschiedlichen Elementen in der Situation zugeordnet werden. Auch bezogen auf das Ego-Fahrzeug können Voraussetzungen definiert sein. Im Datenbankeintrag müssen also jeweils vier Attribute festgehalten werden: a) welchem Objekt die Menge in der Situation zugeordnet wird, b) ob es sich um eine Voraussetzung oder eine Aufgabe handelt, c) zu welchem Merkmal die Menge gehört, sowie d) die Beschreibung der Menge selbst. Zusätzlich muss der Eintrag mit der entsprechenden Situationsbeschreibung verknüpft werden. Zu jeder der Situationsklassen kann es, wie auch im oben genannten Beispiel, mehrere Mengen geben.

Im zuvor genannten Beispiel müssen also die Geschwindigkeit (*vorsichtig vorbeifahren*) sowie der Seitenabstand (*ausreichend*) definiert werden und den Aufgaben des Ego-Fahrzeugs zugeordnet werden. Als Voraussetzung muss erfüllt sein, dass der Abstand zum Gegenverkehr entweder zu einer Menge, die mindestens *ausreichend Sicherheitsabstand* ist, gehört oder kein Gegenverkehr vorhanden ist. Dafür kann es sich auch anbieten, die Menge *ausreichend Abstand* nicht auf den Gegenverkehr, sondern auf die infrastrukturellen Platzverhältnisse zu beziehen. Ein automatisiertes Fahrzeug ermittelt aus den Umfeldinformationen auch Freiräume, die für das Fahrzeug befahrbar sind. Sind solche Informationen vorhanden, kann daraus der verfügbare Raum und Längs- und Querrichtung bewertet werden.

Die Menge *halten* oder *stehen* in Bezug auf die Geschwindigkeiten scheint zunächst nicht unscharf, da sie einer Geschwindigkeit von Null entspricht. Es ist jedoch in Bezug auf die Verkehrsregeln in diesem Fall ebenfalls sinnvoll, diese Menge unscharf zu definieren, denn dieselbe Regel würde ebenso bei sehr geringen Geschwindigkeiten des Busses gelten und es können so auch Ungenauigkeiten in den Messwerten einbezogen werden. Darin liegt auch der Vorteil der Nutzung der Fuzzylogik. Nicht nur die Unschärfe in den Verkehrsregeln kann damit gehandhabt werden, sondern auch die Ungenauigkeit in den Messwerten. Da Messwerte den unscharfen Mengen zugeordnet werden, müssen sie nicht so präzise sein, wie bei Nutzung von mathematischen Modellen, bei denen dann evtl. die Ungenauigkeit des Sensors mit einberechnet werden muss.

Tabelle 5.1 gibt die entsprechenden Datenbankeinträge für die Beispielsituation wieder.

Tabelle 5.1: Datenbankeinträge der unscharfen Mengen zur Beispielsituation

Referenzobjekt	Referenzattribut	Menge	Kategorie
Linienbus	Geschwindigkeit	stehen	Voraussetzung
Gegenverkehr	Längsabstand	ausreichend	Voraussetzung
Ego-Fahrzeug	Geschwindigkeit	vorsichtig	Aufgabe
Ego-Fahrzeug	Positionierung lateral	ausreichend Sicherheitsabstand	Aufgabe

Aus der Beispielsituation wird deutlich, dass nicht alle Attribute abgebildet sind, die in der Situation relevant sind. Auf Fußgänger wird beispielsweise in dieser Frage nicht eingegangen. Diese werden in einer weiteren Frage behandelt, wozu wiederum entsprechende Mengen definiert werden. Sollten Fußgänger in der Situation vorhanden sein, würden beide Situationsklassen durch das Data Matching identifiziert werden und entsprechend mehrere Regeln aufgestellt werden, die auch mehrere Fuzzy Mengen als Voraussetzungen und Fahraufgaben beinhalten können. Eine Trennung der Klassen, wie in Kapitel 3.2 vorgestellt, hat jedoch den Vorteil, dass in diesem Fall alle Attribute mit dem logischen UND verknüpft werden können und keine ODER Verknüpfungen nötig sind.

Für jedes Attribut werden mehrere unscharfe Mengen definiert. Für die unscharfen Mengen müssen Zugehörigkeitsfunktionen gefunden werden, in denen auf der x-Achse die entsprechenden Einheiten zu finden sind und jeweils Zugehörigkeiten zwischen Null und Eins zu definieren sind. Hierfür wurde die Wortwahl der Formulierungen in den Testfragen und der Straßenverkehrsordnung analysiert. Aus den Situationsklassen, die in der Datenbank die Verkehrsregeln beschreiben, wurden die folgenden Mengen in Bezug auf die Voraussetzungen der Situationen identifiziert:

- Geschwindigkeit der Objekte
- Geschwindigkeit der Objekte relativ zum Ego-Fahrzeug
- Longitudinale Positionierung relativ zum Ego-Fahrzeug
- Laterale Positionierung relativ zum Ego-Fahrzeug

Des Weiteren wird der Begriff *Gefährdung* des Öfteren gebraucht. Dieser Begriff ist nicht definiert, bestimmt jedoch, ob das Fahrzeug eine Handlung ausführen darf oder nicht. Die Gefährdung ist dichotom: Es muss ermittelt werden, ob Andere gefährdet sind oder nicht. Kann die Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer, insbesondere verletzlicher Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger oder Radfahrer, nicht ausgeschlossen werden, muss das Ego-Fahrzeug die eigenen Handlungen entsprechend anpassen. Zumeist geschieht das durch die Reduktion der Geschwindigkeit. Von einem technischen System, dessen Eingangsdaten selbst mit Fehlern behaftet sind, kann so ein absolutes Urteil wie *die Gefährdung ist ausgeschlossen* nicht erwartet werden. Lediglich mittels physikalischer Grenzwerte könnte ermittelt werden, dass sich zwei in Konflikt stehende Verkehrsteilnehmer nicht treffen können. Eine weitere Möglichkeit diesen Aspekt zu adressieren, ist die Darstellung einer solchen Variable in einem weiteren Fuzzy System, in dem mit Hilfe verschiedener Indikatoren berechnet wird, wie hoch die Gefährdung ist. Ähnlich kann auch mit dem Eingangswert für den Verkehrszustand vorgegangen werden. Als weitere Möglichkeit kann ein System stets davon ausgehen, dass die Gefährdung nicht ausgeschlossen ist und somit immer ein konservativeres Verhalten wählen.

Die meisten der Situationsbeschreibungen beinhalten in der Formulierung der Voraussetzungen wenig unscharfe Mengen. In den Situationen des Fragebogenkatalogs wird häufig statt einer wörtlichen Beschreibung ein Bild oder Video gezeigt. In diesen Fällen wurden solche Beschreibungen aus diesen Bildern unter Nutzung der sonst verwendeten Begriffe aus den

zugrundeliegenden Verkehrsregeln der StVO extrahiert. Die definierten Mengen für die Voraussetzungen und deren Darstellung in Form von Zugehörigkeitsfunktionen werden in der folgenden Abbildung 5.6 für das betrachtete Beispiel dargestellt. Es wurden einfache Formen wie Trapeze oder Dreiecke für die Zugehörigkeitsfunktionen verwendet. Es ist erkennbar, dass einige der verwendeten Mengen Teilmengen anderer darstellen.

Die Abszisse ist in der Grafik nicht mit Werten beschriftet, da diese verschieden definiert werden können. Ein Ansatz ist die Normierung der Werte, indem ein Wert, der relativ klar abgegrenzt werden kann, zunächst definiert wird und die anderen Werte entsprechend darum bestimmt werden. Bei den Geschwindigkeiten ist beispielsweise der Höhepunkt der Menge der Schrittgeschwindigkeiten bei 4-6 km/h. Für den stätischen Verkehr entspricht die Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h dem Start des Plateaus der Menge *normal*. Um die Zugehörigkeitsfunktionen möglichst in vielen Bereichen verwenden zu können, wird die aktuelle Geschwindigkeitsbegrenzung als Fixpunkt verwendet und die Werte zu den darunterliegenden Mengen als prozentualer Anteil der Geschwindigkeitsbegrenzung gemessen.

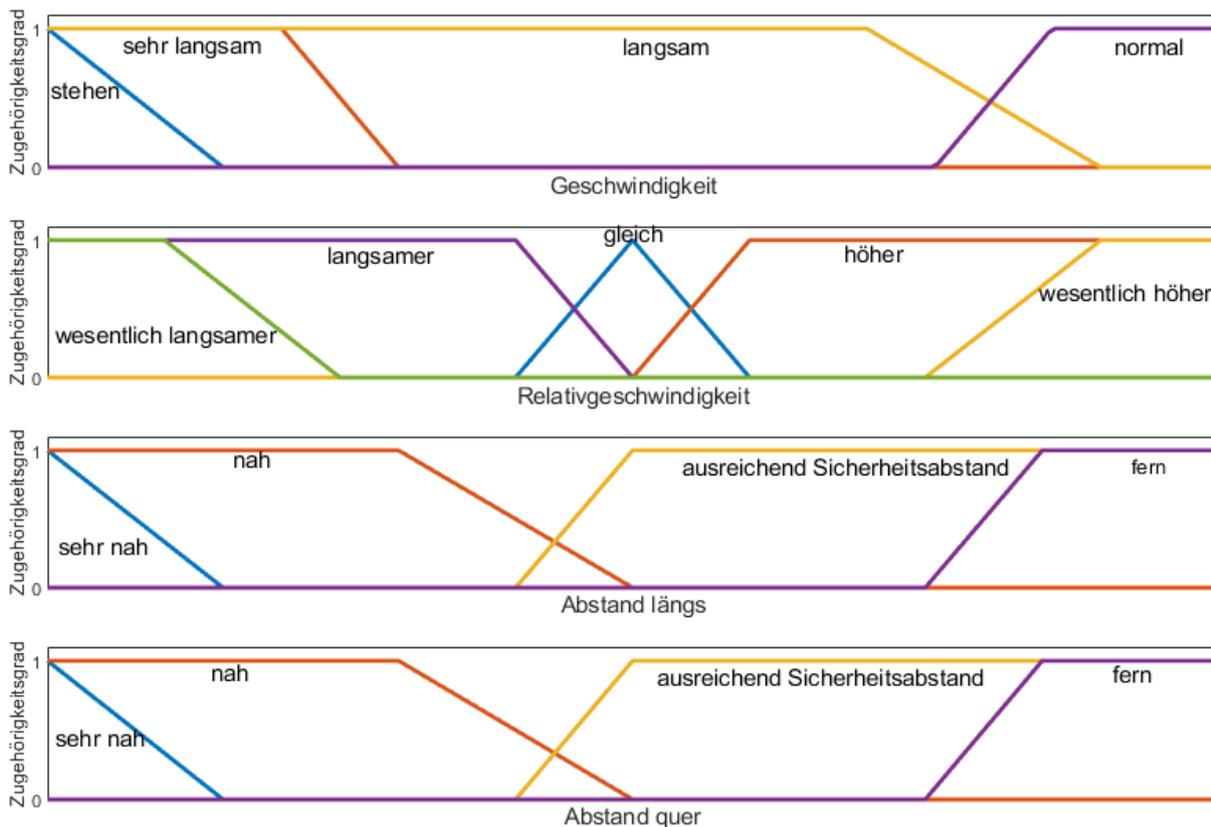


Abbildung 5.6: Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy Mengen der Voraussetzungen

Der Abstand wird sinnvollerweise in Relation zur Geschwindigkeit gemessen und ebenso normiert angegeben. Bis auf die Menge *ausreichend Sicherheitsabstand* wird in den Verkehrsregeln keine Formulierung genannt, lediglich aus den Beispielbildern des Fragebogenkatalogs ist dies zu interpretieren. Der Sicherheitsabstand kann mit Hilfe der Geschwindigkeit errechnet

werden. In der StVO heißt es dazu in §4 zum Abstand: „*Der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch dann hinter diesem gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird.*“ [§4 Satz 1 StVO, BUNDESMINISTERIUMS DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ] Dies hängt also von der gefahrenen Geschwindigkeit der beiden Fahrzeuge, den physikalischen Grenzen beim *plötzlich gebremst werden* sowie der Reaktionszeit des Folgefahrzeugs ab. Von einem Fahrzeug mit entsprechender Sensorik könnte dieser Abstand dann berechnet werden, allerdings ist auch dann nicht eindeutig, wie weit hinter dem Vorderfahrzeug gehalten werden muss.

Für die Handlungsoptionen des Fahrzeugführers in den jeweiligen Situationen wurden die folgenden Mengen in den verschiedenen Attributen identifiziert:

- Zielgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs
- Nötige Geschwindigkeitsanpassung des Ego-Fahrzeugs
- Positionierung des Ego-Fahrzeugs in Längsrichtung
- Positionierung des Ego-Fahrzeugs in lateraler Richtung zur Fahrbahn bzw. relativ zu den Objekten

Die verwendeten linguistischen Variablen, die die Ausprägungen in den einzelnen Mengen beschreiben, sind umfangreich. Für die Reduktion der Geschwindigkeit wird beispielsweise nicht nur das Wort *bremsen* oder *abbremsen*, sondern auch *verzögern* oder *vermindern* verwendet. Bei der Definition der unscharfen Mengen wurden solche Begriffe, wo keine Differenzierung in der Bedeutung, sondern lediglich eine unterschiedliche Wortwahl zu erkennen ist, zusammengefasst.

Nach der Extraktion der Mengen aus den Formulierungen der Verkehrsregeln und Fragen fällt auf, dass die Mengen nicht immer alle denkbaren Ausprägungen eines Attributes enthalten. Das geschieht auf Grund dessen, dass nur die tatsächlich verwendeten Formulierungen der Verkehrsregeln als Mengen aufgenommen wurden. So ist in den Geschwindigkeitsänderungen beispielsweise keine Menge zur Beschleunigung vorhanden. Es sind jedoch Situationen denkbar, in denen sie eine sinnvolle Erweiterung darstellen könnte. In den Verkehrsregeln wird jedoch nicht explizit das Beschleunigen von einem Fahrzeugführer gefordert. Eher kommt es vor, dass die Geschwindigkeit adressiert wird. So wird beispielsweise gefordert *zügig* zu fahren. Im Vergleich zwischen der aktuellen Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und der Handlungsempfehlung kann so aus dem Regler trotzdem eine Beschleunigung resultieren.

Die aus den Regeln und Fragebögen extrahierten Mengenbeschreibungen wurden dann geordnet, sodass sie in einem Diagramm mit gemeinsamer Abszissenachse dargestellt werden können und möglichst wenig Überschneidungen aufweisen. Wie auch bei den Mengen, die die Voraussetzungen darstellen, gibt es darunter auch Mengen die Teilmengen von anderen darstellen. So ist in der Fuzzyfunktion der Geschwindigkeitsänderung ein *starkes abbremsen* beispielsweise eine Teilmenge von *reduzieren*.

Auch bei den Ausgabemengen gibt es Variablen, die dichotom sind. Zum Beispiel wird in einigen Fällen durch die Verkehrsregeln das Verwenden von *Signalen* wie dem Fahrtrichtungsanzeiger gefordert. Des Weiteren wird häufig auf die *Aufmerksamkeit*, besondere Beachtung bestimmter Objekte hingewiesen. Auch der allgemeine Hinweis der Vorfahrtsregelung kann mit den beiden Mengen *Vorfahrt* oder *Vorfahrt gewähren* dichotom dargestellt werden. Die Ausgabewerte beziehen sich auf das Verhalten des Fahrzeugs und sind ebenfalls über Zugehörigkeitsfunktionen definiert. Sie sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

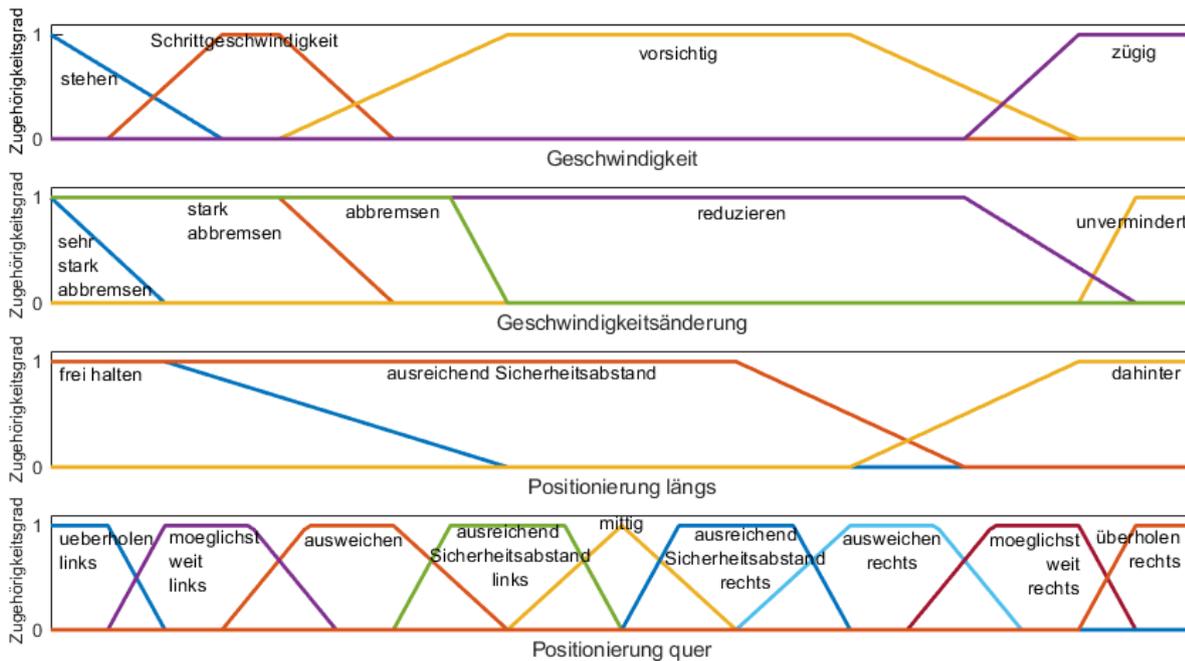


Abbildung 5.7: Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgabewerte des Fuzzy Systems aus den verwendeten Begriffen der Verkehrsregeln

In der Datenbank der Fahrsituationsklassen, die die Regeln beschreiben, werden mehrere Situationen dargestellt, falls es verschiedene Möglichkeiten gibt, wie eine Situation zu lösen ist. Somit müssen die Mengen in den Voraussetzungen und den Aufgaben nicht mit dem logischen ODER kombiniert werden, sondern stets mit dem logischen UND. Die Regelbasis kann extrahiert werden, wenn klar ist, welche Situationsklassen prinzipiell passend sind, was durch das Data Matching geschehen ist. Kapitel 5.2.2 beschreibt das Vorgehen zum Auffinden der Regeln und das Inferenzsystem, worin das korrekte Verhalten geschlossen wird.

5.2.2 Definition der Regelbasis und Inferenzsystem zur Verhaltensentscheidung auf Basis von Verkehrsregeln

In der Regel ist eine unscharfe Menge nicht ausreichend, um eine Verkehrsregel zu beschreiben. Meist gibt es mehrere Mengen, die als Voraussetzung gelten, dass eine Verkehrsregel anzuwenden ist. Auch die Fahraufgabe für das Ego-Fahrzeug in der Situation wird häufig durch weitere unscharfe Mengen definiert. Sollen die Verkehrsregeln also mit unscharfen Mengen abgebildet werden, müssen verschiedene Mengen zu einer Regel kombiniert werden. Es

werden logische Operationen verwendet, um die Mengen zu kombinieren und Handlungen zu schlussfolgern. Das Fuzzy System wird dazu verwendet, eine Fahraufgabe für den Fahrer bzw. das automatisierte Fahrsystem zu identifizieren.

Die folgende Abbildung 5.8 zeigt ein Beispiel einer Fahrsituation, welches zur oben beschriebenen Frage passend ist. Das Ego-Fahrzeug (weiß) beabsichtigt auf dem Streckenelement geradeaus zu fahren (oranger Pfeil: Wunschmanöver). Ein Bus hat vor dem Ego-Fahrzeug an einer gekennzeichneten Haltestelle gehalten. Zusätzlich steht am Fahrbahnrand ein Fußgänger an der Haltestelle und ein Fahrzeug kommt auf der Gegenfahrbahn entgegen.

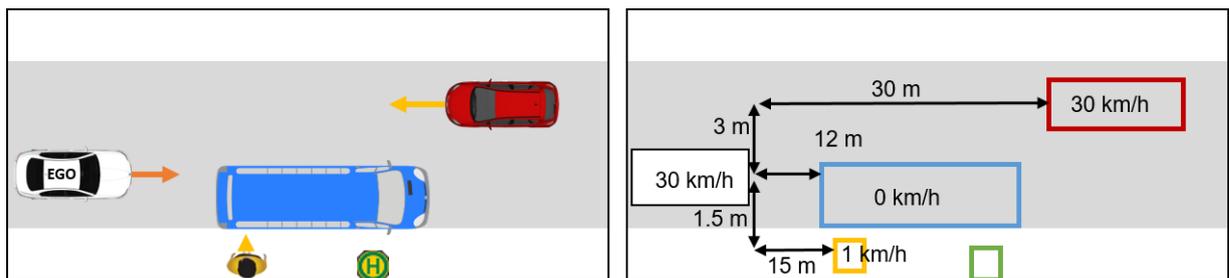


Abbildung 5.8: Beispielsituation aus der Situationsdatenbank, für die ein adäquates Fahrverhalten identifiziert werden soll (links Bild mit Objekten und Manövern, rechts mit beispielhaften Messwerten)

Die Anzahl der benötigten Fuzzy Mengen, um eine Regel zu beschreiben variiert. In den oben genannten Beispielen werden jeweils zwei Fuzzy Mengen miteinander kombiniert und bilden die Voraussetzung (WENN-Teil) und eine Fuzzy Menge beschreibt die Handlung (DANN-Teil). Es kommt jedoch auch vor, dass unterschiedliche Anzahlen an Kombinationen benötigt werden, sowohl im WENN, als auch im DANN Teil der Regel.

Für das oben abgebildete Beispiel werden die Regeln identifiziert, die sich aus den Situationsklassen ergeben. Die Regeln ergeben sich aus der Zuordnung zu den Klassen. Einige der Regeln überschneiden sich. Sie stellen zwar unterschiedliche Fragen des Fragebogenkataloges dar, werden jedoch die Objekte der Klassen den in der Situation vorhandenen Objekten zugeordnet, ergeben sich einige identische Formulierungen, die aussortiert werden können. Zu dieser Situation finden sich in der Regelbasis beispielsweise die passende Situationsklasse, in der sich ebenfalls ein Bus an einer Haltestelle vor dem Ego-Fahrzeug befindet und die besonderen Regeln gegenüber öffentlichen Verkehrsmitteln abgefragt werden (vgl. die in Kapitel 5.2.1 vorgestellte Beispielfrage) sowie die in Abbildung 4.6 gezeigte Frage, in der ein anderes Fahrzeug, dessen Typ nicht relevant ist, vor den Ego-Fahrzeugs steht und auf Grund des ebenfalls vorhandenen Gegenverkehrs nicht an diesem vorbeigefahren werden darf.

Die logischen Formulierungen ergeben sich aus der Regelbasis, die aus der Datenbank abgefragt wird. Alle zu der Situation aufgestellten Regeln können dem Anhang 3 entnommen werden, unter anderem sind es die folgenden:

*WENN Relativgeschwindigkeit_{Vorderfahrzeug} langsamer UND Relativgeschwindigkeit_{Vorderfahrzeug} = NICHT wesentlich langsamer
UND Abstand längs_{Vorderfahrzeug} NICHT ausreichend Sicherheitsabstand
UND Abstand quer_{entgegenkommendes Fahrzeug} NICHT fern,
DANN Geschwindigkeitsänderung =reduzieren,
Positionierung quer NICHT überholen links*

*WENN Abstand quer_{entgegenkommendes Fahrzeug} = sehr nah UND Abstand längs_{entgegenkommendes Fahrzeug} =nah
DANN Positionierung quer=möglichst weit rechts*

*WENN Geschwindigkeit_{Vorderfahrzeug} = wesentlich langsamer
UND Abstand längs_{entgegenkommendes Fahrzeug} = fern,
DANN Positionierung quer = überholen links*

WENN Geschwindigkeit_{Bus} = stehen, DANN Geschwindigkeit = vorsichtig

*WENN Geschwindigkeit_{VRU} NICHT stehen UND Abstand längs_{VRU} = sehr nah,
DANN Geschwindigkeitsänderung =abbremsen, Aufmerksamkeit = erhöht*

*WENN Abstand längs_{VRU} = nah UND Abstandquer_{VRU} = nah,
DANN Geschwindigkeit = vorsichtig*

*WENN Abstand längs_{Verkehrszeichen} = nah UND Abstand längs_{VRU} = nah,
DANN Aufmerksamkeit = erhöht, Geschwindigkeitsänderung =reduzieren*

Mit Hilfe der Sensorik des Fahrzeugs werden die Werte der Referenzattribute zu den entsprechenden Objekten ermittelt. Abbildung 5.8 (rechts) zeigt die Beispielsituation mit den zugehörigen beispielhaften Messwerten aus der Umfelderkennung des Ego-Fahrzeugs, die zur Bewertung der Regeln relevant sind. Daraus wird geschlossen, zu welchem Grad die einzelnen Regeln auf die Situation zutreffend sind. Die Regelbasis des Inferenzsystems wird in jeder Situation durch eine Datenbankabfrage neu generiert, da jeweils verschiedene Eigenschaften der Situation relevant sind. Da sich die Mengen jeweils auf verschiedene Objekte in der Situation beziehen können, wird die Regel konkret auf das relevante Objekt bezogen, wie auch in den zuvor genannten Formulierungen. Daher müssen auch die Fuzzyfunktionen für jedes Objekt separat erstellt werden. In diesem Fall gibt es also beispielsweise eine Fuzzyfunktion für den Längsabstand zum Bus und eine weitere für den Längsabstand zum Gegenverkehr. Dafür wurde die zuvor definierte Funktion jeweils kopiert. Das Inferenzsystem wird also für jede Situation dynamisch aufgestellt und kann immer verschieden sein. Der Vorgang wird als Pseudo-Code in Abbildung 5.9 dargestellt.

```

Algorithmus Aufbau Fuzzy System // zur Ermittlung der notwendigen
Fuzzyregeln und Fuzzyfunktionen

Input: ID der Situation := S

verbinde Datenbank DB, lese Objekttable := Objekte

lese Inferenzsystem FIS // System enthält Fuzzy Funktionen und
zunächst leere Regelbasis

Kandidaten := FunktionDataMatching(S)

für jeden Kandidat in Kandidaten
    FuzzyTabelle := SQLAbfrage(FuzzyTabelle in DB wo ID = Kandidat)
    für jeden Eintrag in FuzzyTabelle
        initialisere FuzzyWennRegel, FuzzyDannRegel
        wenn FuzzyTabelle.Kategorie(Eintrag) = Voraussetzung
            finde Objekt in Objekte mit Objekt-ID =
            FuzzyTabelle.Referenzobjekt(Eintrag)

            objektspezifischeFuzzyfunktion := kopiere
            Fuzzyfunktion aus FIS für Referenzattribut und
            Referenzobjekt

            füge objektspezifischeFuzzyfunktion zu FIS hinzu

            füge FuzzyWennRegel bestehend aus Attribut, Menge
            und Objekt zu FIS hinzu

        sonst // FuzzyTabelle.Kategorie(Eintrag) = Aufgabe
            füge FuzzyDannRegel aus Attribut und Menge zu FIS
            hinzu

        Ende wenn

    FuzzyWenn := Verknüpfe alle Elemente in FuzzyWennRegel mit UND
    FuzzyDann := Verknüpfe alle Elemente in FuzzyDannRegel mit UND
    füge [FuzzyWenn, FuzzyDann] zu Regelbasis hinzu
    Ende für-Schleife
Ende für-Schleife

```

Abbildung 5.9: Pseudo-Code für das Vorgehen beim Erstellen der Fuzzy Regelbasis

In Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs und der Geschwindigkeitsbegrenzung, werden die Eingangsdaten, die in Abbildung 5.8 dargestellt sind und in Metern bzw. km/h angegeben sind, normiert. Dazu werden die folgenden Berechnungen angestellt, die jeweils einen Fixpunkt der Fuzzyfunktion bilden:

1. Der Längsabstand gehört zur Menge *ausreichend Sicherheitsabstand*, wenn
 - a. mindestens die Faustregel *Tacho/2 in Metern* gilt:

$$\text{Abstand längs}_{\text{Fuzzy}} = \text{Abstand längs}_{\text{Eingabe}} / (\text{Geschwindigkeit}_{\text{Ego}} / 2)$$

- b. für den Abstand entgegenkommender Fahrzeuge *Tacho*2 in Metern* gilt:

$$\text{Abstand längs}_{\text{Fuzzy}} = \text{Abstand längs}_{\text{Eingabe}} / (\text{Geschwindigkeit}_{\text{Ego}} * 2)$$

2. Der Seitenabstand gehört zur Menge *ausreichend Sicherheitsabstand*, wenn mindestens eine halbe Fahrstreifenbreite zwischen den Referenzpunkten der Objekte liegt:

$$\text{Abstand quer}_{\text{Fuzzy}} = \text{Abstand quer}_{\text{Eingabe}} / 1.75\text{m}$$

3. Die Geschwindigkeit gehört zur Menge *normal*, wenn die Geschwindigkeitsbegrenzung eingehalten wird:

$$\text{Geschwindigkeit}_{\text{Fuzzy}} = \text{Geschwindigkeit}_{\text{Eingabe}} / \text{Geschwindigkeitsbegrenzung}$$

4. Die relative Geschwindigkeit gehört zur Menge *gleich*, wenn es keine Abweichung von der Ego-Geschwindigkeit gibt:

$$\text{Relative Geschwindigkeit}_{\text{Fuzzy}} = \text{relative Geschwindigkeit}_{\text{Eingabe}} / \text{Geschwindigkeit}_{\text{Ego}}$$

In der Fuzzifizierung werden die so umgewandelten Eingangsgrößen verwendet und mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen den unscharfen Mengen zugeordnet. Dann werden die Regeln im Inferenzsystem angewandt. Für jede Regel wird ermittelt, ob die Bedingungen erfüllt werden. Dazu ist zunächst zu entscheiden, welche Berechnungen für die Verknüpfungen mit den logischen Operatoren verwendet werden. In der Regelbasis werden die Voraussetzungen stets mit UND verknüpft, daher wird die Minimum-Methode angewendet. Der kleinste Zugehörigkeitsgrad der Eingabewerte zu den in der Voraussetzung definierten Mengen, entspricht also dem Zugehörigkeitsgrad der Ausgabe zu der in der entsprechenden Regel definierten Menge. So ist dies auch im Beispiel in Kapitel 5.1.2 angewendet worden, was in Abbildung 5.4 dargestellt ist.

Die verschiedenen Regeln adressieren häufig die gleiche Dimension der Ausgabe. Im Beispiel ist hierfür die Zielgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs oder auch die Positionierung oder Geschwindigkeitsänderung nennenswert. Um den verschiedenen Regeln unterschiedliche Bedeutung zukommen zu lassen, können die einzelnen aufgestellten Regeln gewichtet werden. Dafür bietet sich die Punktwertung der zugehörigen Fragen beim theoretischen Führerscheintest an. Die Gewichtungen müssen auf Werte zwischen Null und Eins normiert werden, wobei eine höhere Zahl einer höheren Relevanz der Regel entspricht.

Im Anschluss an die Gewichtung geschieht die Auswertung der Regel. Auch für die sog. Implikation gibt es verschiedene Methoden. Wie auch bei der UND Verknüpfung, kann entweder die Minimum-Methode angewendet werden, wobei das Fuzzy Set der Ausgabe an der Stelle abgeschnitten wird (siehe auch Abbildung 5.4). Als zweite Methode gilt die Produkt-Methode,

Ziel der Entscheidungsfindung ist nicht, eine konkrete Trajektorie zu ermitteln, sondern eine korrekte Fahrstrategie auszuwählen. Für die Entscheidung konkreter Werte, die durch die Fahrzeugregler umgesetzt werden, wären einige weitere Regeln nötig, damit beispielsweise je nach Abstand zum Vorderfahrzeug und Geschwindigkeit die nötige Geschwindigkeitsänderung errechnet werden kann. Für die Entscheidung über die Parameter des Inferenzsystems sollten dann auch Betrachtungen über die gewünschte Fahrweise getätigt werden und dementsprechend auch, wie die Werte in der Funktion abgebildet werden. Einige Beispiele solcher Anwendungen finden sich bereits in der Literatur, es ist jedoch nicht Fokus dieser Arbeit.

Für die Definition einer Fahrstrategie als Ausgabe des Inferenzsystems ist also der Schritt der Defuzzifizierung nicht nötig, es ist ausreichend, wenn die Fahrstrategie ebenfalls unkonkrete Angaben macht. Für die Beispielsituation ergeben sich, unabhängig von der konkreten Definition, folgende Ausgaben:

- *vorsichtig fahren,*
- *Geschwindigkeit reduzieren,*
- *nicht links überholen,*
- *erhöhte Aufmerksamkeit.*

Als Vergleich wurde aus der Situation das Fahrzeug im Gegenverkehr sowie der Fußgänger entfernt. Entsprechend wurden weniger Situationsklassen aus der Datenbank und auch weniger relevante Regeln extrahiert. Für die Fahrstrategie lässt sich dann zusammenfassen:

- *vorsichtig fahren,*
- *links überholen.*

Die Fuzzyfunktionen der Ausgaben sind in der folgenden Abbildung 5.11 dargestellt, wobei rot die Ausgaben der Situation mit Fußgänger und Gegenverkehr markiert und grün die der Situation ohne diese Verkehrsteilnehmer. Die übrigen Eingangsdaten wurden analog zu den in Abbildung 5.8 dargestellten angegeben. Es sind jeweils mehrere Markierungen für die Methoden der Defuzzifizierung *bisector*, *mom* und *centroid* dargestellt.

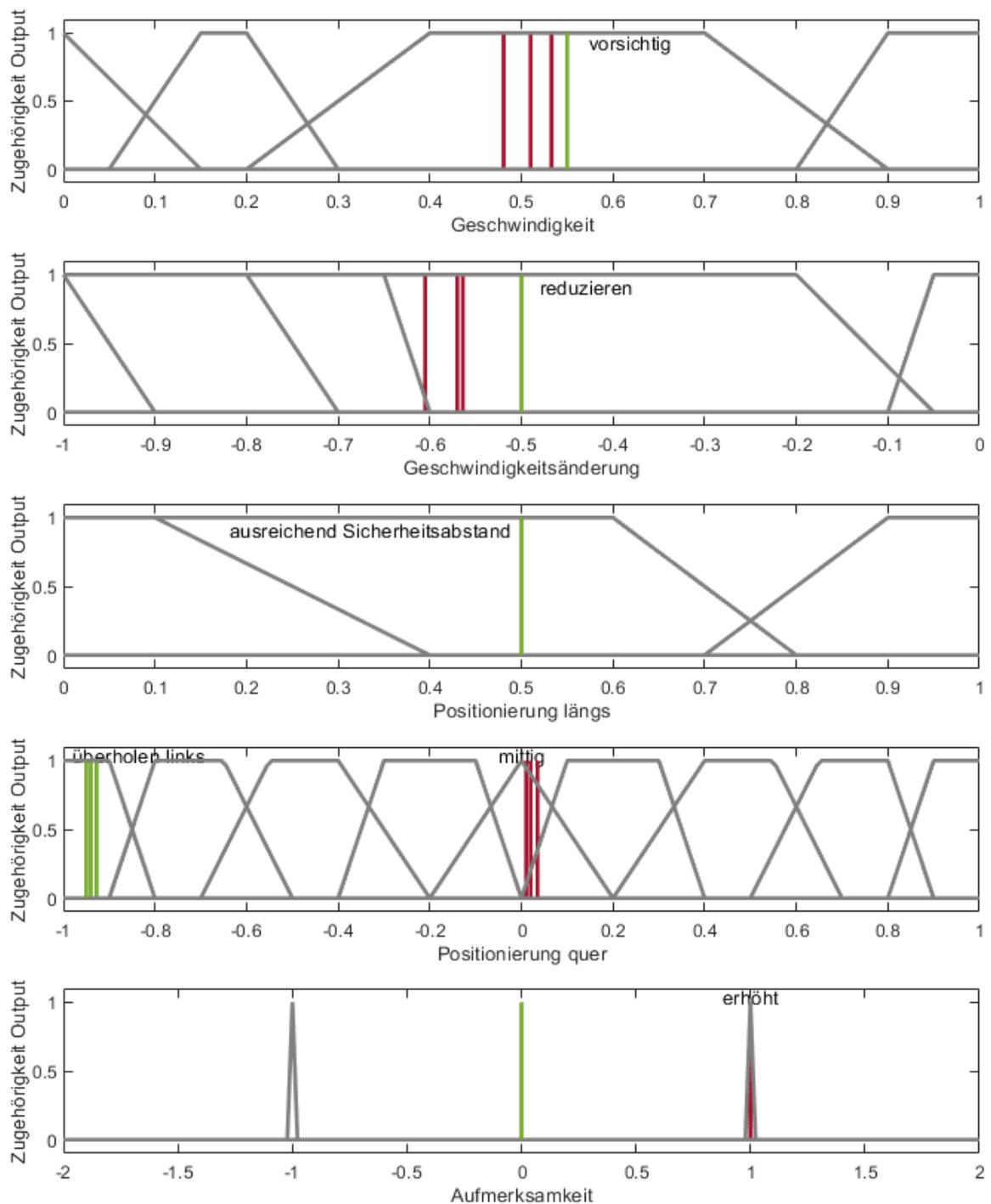


Abbildung 5.11: Ergebnisse der Fuzzy Inferenz für die beiden Beispielsituationen in den verschiedenen Ausgabedimensionen

Die gewählten Ausgabewerte beziehen sich bereits auf die Aktuatoren des Fahrzeugs. Durch die Regler des Fahrzeugs kann auf Basis der Fahrstrategie eine entsprechende Umsetzung geplant werden. Tabelle 5.2 gibt eine Übersicht über die Outputs des Fuzzy Systems und beschreibt an welche Regler des automatisierten Fahrsystems diese weitergegeben werden müssen, um dann eine Trajektorie planen zu können.

Tabelle 5.2: Übersicht der Outputs des Fuzzy Inferenzsystems

Input für...	Ausgaben des Fuzzy Systems
Längsregler	Positionierung längs, Geschwindigkeitsänderung, Geschwindigkeit, Vorfahrt
Querregler	Positionierung quer
Anzeigeelemente	Signal (Fahrtrichtungsanzeiger)
Sensorik	Aufmerksamkeit

Die Ausgabe des entwickelten Systems liefert einen Vorschlag für ein angepasstes Verhalten an die Fahrsituation bezüglich der Dimensionen in der Ausgabe für die Regler, die in Tabelle 5.2 genannt wurden. Gibt es für einen der Ausgabewerte keine Ausgabe, bedeutet dies, dass das Fahrzeug dieses Attribut im Vergleich zur aktuellen Handlung nicht anpassen muss bzw. nur Geschwindigkeitsbegrenzungen einhalten muss und das Wunschmanöver ausführen darf.

5.2.3 Diskussion

Es zeigt sich, dass durch die Anwendung der Fuzzylogik korrekte Anweisungen für Fahraufgaben gefunden werden können. Üblicherweise wird zunächst ein Anwendungsfall gesucht und dann die Regeln für den einen Anwendungsfall aufgestellt. Das in dieser Arbeit vorgestellte System verwendet jedoch eine Wissensbasis, in der zu allen Situationsklassen einige Regeln aufgestellt sind. Es werden dann alle Regeln der verschiedenen Situationsklassen, die durch das Data Matching als möglicherweise gültige Regeln vorsortiert wurden, für das Inferenzsystem verwendet. Dadurch können sich jedoch auch Probleme ergeben, da somit die Regeln gewissermaßen gegeneinander abgewogen werden. Das ist in einigen Fällen sinnvoll, kann jedoch auch problematisch werden.

Durch die Aggregation der Ausgabewerte und für den Fall, dass ebenfalls eine Defuzzifizierung angewendet werden sollte, müssen die Regeln differenzierter betrachtet werden. In einigen Fällen sollten beispielsweise Regeln nicht gemeinsam betrachtet werden, sondern es besteht eine Regel, die eine andere Regel ungültig macht. Die Gewichtung der Regeln durch die verwendeten Punktwertungen der Testfragen des theoretischen Führerscheinkatalogs ist ein Ansatz, dieses Problem zu lösen. Die Punktevergabe ist jedoch noch zu wenig differenziert. Die meisten der Regeln zum Verhalten in Straßenverkehr, insbesondere solche zur Vorfahrt, haben darin eine sehr hohe Wertung. Manche Situationen, wie das Stehen an einer roten Lichtsignalanlage, kommen in den Testfragen nicht vor. Diese wurden zwar, da sie Teil der Straßenverkehrsordnung sind, hinzugefügt, eine Wertung fehlt jedoch.

Für die genannte Problematik bietet sich ein hierarchisches System an, in dem beschrieben wird, welche Regel welcher anderen untergeordnet ist. Auch die in Kapitel 4.2.2 genannte

Problematik, dass es relevant sein kann, dass ein gewisses Objekt in einer Situation nicht vorhanden ist, kann so adressiert werden.

5.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Um auf Basis der Formulierungen, wie sie in der Straßenverkehrsordnung zu finden sind, Entscheidungen zu treffen, müssen viele Begriffe interpretiert oder definiert werden. Dieses Kapitel beinhaltet eine Herangehensweise unter Verwendung der Fuzzylogik. Nachdem einige Kandidaten der anzuwendenden Verkehrsregeln mittels Data Matching aus den Situationsklassen, die die Verkehrsregeln beschreiben, extrahiert wurden, muss bestimmt werden, welches Verhalten für das Ego-Fahrzeug adäquat ist. Hierzu lassen sich Regeln formulieren. Die Regeln beinhalten häufig unscharfe Mengen, es muss jeweils bestimmt werden, ob die Attribute der Situationsbeschreibung zu diesen unscharfen Mengen gehören, um ermitteln zu können, ob eine betrachtete Verkehrsregel anzuwenden ist oder nicht.

Für die Situationsklassen, die in der Datenbank als Fahrverhaltensregeln aus der Straßenverkehrsordnung und den Fragen zum theoretischen Führerscheintest extrahiert wurden, wurden die Formulierungen analysiert. Auf Basis dessen wurde identifiziert, welche Attribute der Situation durch den Fahrzeugführer bzw. die Sensorik eines automatisierten Fahrzeugs erkannt werden müssen, um zu ermitteln, ob die Voraussetzungen erfüllt sind, dass eine gewisse Verkehrs- oder Verhaltensregel anzuwenden ist. Des Weiteren wurden die unscharfen Mengen analysiert, die das vom Fahrzeug in der Situation anzuwendende Fahrverhalten bestimmen. Die verwendeten Begriffe wurden sinnvoll zusammengefasst und eine Einteilung und Abstufung der Mengen sowie mögliche Berechnungsvorschriften wurden vorgeschlagen.

Am Beispiel wurde gezeigt, dass die Situationsbeschreibungen der Fahr- und Verhaltensregeln der deutschen Straßenverkehrsordnung nur wenig standardisiert sind und viel Interpretation des Verkehrsteilnehmers bedürfen. Insbesondere lässt die Wortwahl in der Formulierung der Regeln nicht immer erkennen, ob verschiedene Mengen gemeint sind oder lediglich Synonyme verwendet werden. In den verwendeten Situationsklassen werden zumeist mehrere Mengen als Voraussetzungen, dass eine gewisse Regel angewandt werden muss, definiert. Diese Voraussetzungen stellen dar, was durch den Fahrzeugführer bzw. die Sensorik erkannt werden muss. Auch die Aufgaben für das korrekte Verhalten in der Situation, wurden mittels mehrerer unscharfer Mengen für jede Regel definiert.

Zusammenfassend ist das zuvor erläuterte Vorgehen in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Situation wurde mit Hilfe des Data Matching Verfahrens den Situationsklassen aus der in dieser Arbeit entwickelten Wissensbasis, die die Verkehrsregeln enthalten, zugeordnet. Ebenso befinden sich in dieser Wissensbasis die zugehörigen unscharfen Regeln. Aus den Formulierungen in den Verkehrsregeln wurden Zugehörigkeitsfunktionen definiert, die das Inferenzsystem verwendet, um die Regeln zu bewerten. Das Inferenzsystem ergibt Ausgaben für die zuvor definierten Aktionen. Für die Implementierung des Systems wurde die MATLAB® Fuzzy Logic

Toolbox verwendet. Auch die Extraktion der Regeln aus der relationalen Datenbank und das Aufstellen dieser geschah über Skripte in MATLAB.

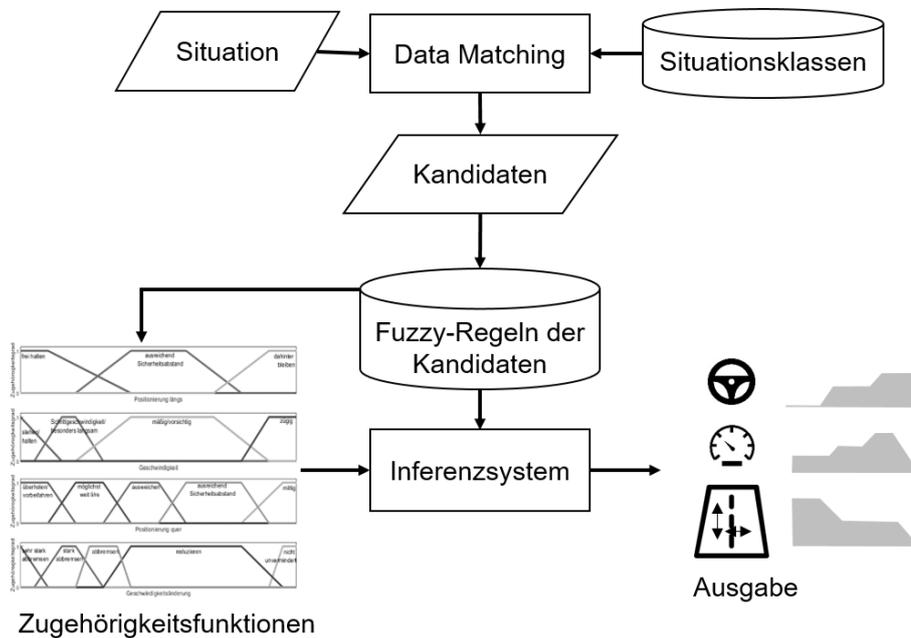


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Erstellung und Auswertung eines Fuzzy System für die Entscheidungsfindung des korrekten Fahrverhaltens

Das Verfahren eignet sich, um Empfehlungen für die Bestimmung der Fahraufgabe auf taktischer Ebene zu geben. Es wird auf eine Wissensbasis zurückgegriffen, die durch die Verkehrsregeln gut definiert ist. Es bestehen jedoch weiterhin Unsicherheiten im Hinblick auf die Formulierung der Regelbasis sowie die Bestimmung der Zugehörigkeitsfunktionen. Die Regeln wurden mit Hilfe verwendeter Formulierungen in unscharfe Mengen übersetzt.

Es kann geschlussfolgert werden, dass auch bei der Verwendung von Systemen wie der Fuzzy Inferenz große Unsicherheiten bestehen, die für eine erfolgreiche Anwendung beantwortet werden müssen. Es ist jedoch denkbar, dass ein solches System verwendet wird, um beispielsweise Verhaltensentscheidungen eines automatisierten Fahrsystems auf einer abstrakteren Ebene zu argumentieren. Ähnlich wie im theoretischen Führerscheintest für Menschen, könnte dies dann auch für den Test der Situationserkennung und -interpretation zum Beispiel im Absicherungsverfahren automatisierter Fahrzeuge verwendet werden. Entsprechende Institutionen könnten dafür Sorge tragen, dass die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, indem beispielsweise die in den Verkehrsregeln verwendeten Begriffe besser abgegrenzt werden.

6. Multidimensionale Bewertung der Kritikalität von urbanen Fahrsituationen

Aus der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik ergeben sich relevante Fahrverhaltensregeln und Konflikte, die in einer betrachteten Fahrsituation berücksichtigt werden müssen. Zwischen den identifizierten Verkehrsregeln und Konflikten bestehen jedoch teilweise erhebliche Unterschiede. Insbesondere stellen manche Situationen größere Gefahren dar als andere. Solche Unterschiede sollten bei der Situationsanalyse und der darauf aufbauenden Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Eine Beurteilung darüber, wie kritisch eine Fahrsituation ist, scheint hierfür hilfreich. Die Fahrsituationen sollen daher nun anhand ihrer Kritikalität bewertet werden. Dafür wird der Begriff zunächst definiert und abgegrenzt. Die Kritikalität kann sich aus vielerlei Komponenten zusammensetzen. Im Kapitel 6.1 wird zunächst auf diese Aspekte eingegangen und eine passende Definition für die vorliegende Fragestellung festgelegt. Die Methodik für die Bewertung der Kritikalität wird im darauffolgenden Abschnitt 6.2 vorgestellt. An einem Beispiel wird diese Methodik im Kapitel 6.3 angewandt und veranschaulicht.

6.1 Kritikalität einer Fahrsituation

Auf die Definition von *kritisch* und den damit in Zusammenhang stehenden Begriffen wurde bereits in Kapitel 2.2.4 eingegangen. Dabei wurde definiert, dass eine Situation *kritisch* ist, wenn sie entscheidend für eine *gefährliche* Entwicklung ist. Eine kritische Situation ist also nicht gleichbedeutend mit einer gefährlichen Situation, sie kann allerdings dazu führen.

Weiterhin wurde herausgestellt, dass die Gefährlichkeit einer Fahrsituation vor allem durch die potenziell entstehenden Unfälle bestimmt wird. Ein Verkehrsunfall entsteht zumeist aus einem Konflikt zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern. Als Konflikt wird eine Situation bezeichnet, die das Risiko einer Kollision birgt [AMUNDSON UND HYDÉN 1977]. Das *Risiko* ist das mögliche Resultat der Situation, es beurteilt also die gefährliche Entwicklung. Die Begriffe Gefährdung und Risiko werden häufig synonym verwendet.

Je höher das Risiko für einen Unfall ist, desto kritischer ist also eine Situation. Um das Risiko zu quantifizieren, werden üblicherweise mehrere Parameter betrachtet. Der sogenannte *Aussetzungsgrad* bestimmt, wie stark die Gefahr in der Situation besteht. Das kann beispielsweise über die Dauer gewisser Situationen an der gesamten Dauer der Fahrt gemessen werden. Der *Schweregrad* beschreibt den potenziellen Schaden, der durch die Gefahr in der Situation entstehen könnte. Als weiterer Faktor wird die *Eintrittswahrscheinlichkeit* der Gefahr berücksichtigt. Diese Faktoren werden mit folgender Gleichung kombiniert:

$$\text{Aussetzungsgrad} * \text{Schweregrad} * \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} = \text{Risiko}$$

Die Faktoren Eintrittswahrscheinlichkeit und Aussetzungsgrad sind besonders schwer zu ermitteln oder abzuschätzen. Diese Faktoren hängen auch vom Fahrer selbst ab. Bewertet man

technische Systeme wie automatisierte Fahrzeuge, können für diese Faktoren, beispielsweise durch die veränderte Reaktionszeit im Vergleich zum menschlichen Fahrer, andere Werte erwartet werden. Daraus lässt sich schließen, dass für automatisierte Fahrzeuge andere Situationen als kritisch identifiziert werden können als für menschliche Fahrer.

In den Regeln der Straßenverkehrsordnung wird das Wort *Gefährdung* des Öfteren verwendet. Dabei wird von den Fahrzeugführern gefordert, sich so zu verhalten, dass eine *Gefährdung* anderer Verkehrsteilnehmer *ausgeschlossen* wird. Die Definition der Gefährdung findet sich in der StVO jedoch nicht und somit auch nicht, wann davon ausgegangen werden kann, dass die Gefährdung ausgeschlossen ist. Es wird folglich vom Verkehrsteilnehmer erwartet, eine Analyse der Situation durchzuführen und dabei die Gefährdung der anderen Verkehrsteilnehmer zu betrachten. In der technischen Norm IEC 61508 wird Gefährdung als „potenzielle Schadensquelle“ definiert. Muss eine Gefährdung in einer Fahrsituation ausgeschlossen werden, darf ein Manöver also nur ausgeführt werden, sofern bestimmt werden kann, dass dabei kein anderer Verkehrsteilnehmer zu Schaden kommt. Für ein technisches System wie das automatisierte Fahrzeug erscheint dies zunächst in einigen Aspekten einfacher, da Sensoren eine hohe Genauigkeit haben. Allerdings sind Sensorinformationen auch mit Unsicherheiten und Fehlern behaftet. Zum einen können in den Messwerten der Sensoren Messungenauigkeiten bestehen, zum anderen ist die Erkennung und Klassifikation der Objekte generell nicht immer gewährleistet [DIETMAYER 2015]. Des Weiteren wird für die Analyse der Gefährdung in einer Situation auch eine Prädiktion der anderen Verkehrsteilnehmer benötigt. Das Ausschließen der Gefährdung, wie in der StVO gefordert, ist folglich für ein technisches System vermutlich unmöglich, da die Unsicherheiten, sowohl in der Objekterkennung als auch der Prädiktion immer einberechnet werden müssen. Sind die Anforderungen an ein System in einer Situation sehr hoch, kann auch dies als kritisch gewertet werden, da das Potenzial für Gefahren steigt.

Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wird der Begriff Kritikalität wie folgt definiert: *Die Kritikalität einer Fahrsituation gibt an, wie hoch das Potenzial ist, dass sich die Situation zu einer gefährlichen Situation entwickelt.*

Neben der Gefährdung, bzw. dem Risiko für einen Unfall, könnten die Anforderungen an das System in der Betrachtung der Kritikalität hinzugezogen werden. Das kann beispielsweise über die Menge der zu erkennenden Objekte und Merkmale der Situation quantifiziert werden. Da Sensordaten fehlerbehaftet sind, ist davon auszugehen, dass sich die Fehler bei einer höheren Anzahl zu detektierender Merkmale summiert.

Wie in Kapitel 4 erwähnt, können Aspekte aus den in dieser Arbeit verwendeten Daten für eine Bewertung der Kritikalität herangezogen werden. Bei den Verkehrsunfalldaten sind dies beispielsweise die Häufigkeit oder die Schwere der Unfallfolgen. Bei den Verkehrsregeln aus dem Fragekatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung besteht eine Klassifikation nach Wichtigkeit durch die Punktevergabe in der Prüfung. Auf die Methodik, diese für die Bewertung der Kritikalität der Fahrsituationen einzubeziehen, wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

6.2 Bewertungsmethodik

Die Bewertung der Fahrsituationen soll die verschiedenen Dimensionen gemeinsam betrachten. Sowohl die Gefahren einer Situation, als auch die Anforderungen an das automatisierte Fahrsystem sollen in die Bewertung einbezogen werden. Zunächst müssen hierfür die einzelnen Dimensionen analysiert werden und passende Kriterien zur Bewertung gefunden werden. Auch die Skalierungen müssen passend gewählt werden, sodass es ermöglicht wird, alle Dimensionen gemeinsam in eine Bewertung einfließen zu lassen und zu kombinieren. Nur so können im Nachhinein verschiedene Situationen hinsichtlich ihrer Kritikalität verglichen werden.

Die Konflikte und anzuwendenden Verkehrsregeln, die den Fahrsituationen mit Hilfe der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik zugeordnet wurden, liefern die Grundlage der Bewertung. Insbesondere das Risiko der Unfälle, die aus den Konflikten entstehen können, kann je nach Situation sehr unterschiedlich eingestuft werden. Bei den Unfallfolgen wurde schon aus den Analysen in Kapitel 4.1.1 deutlich, dass es Fahrsituationen gibt, die zu weitaus schwereren Folgen führen können als andere. Die Schwere der Unfallfolgen ist auch nach ISO 26262 in die Bewertung des Risikos einzubeziehen [ISO 26262: 2011].

Es stehen Daten über das Unfallgeschehen im Testgebiet zur Verfügung, aus denen sowohl die Häufigkeit gewisser Unfalltypen, als auch der Schweregrad der daraus resultierenden Folgen extrahiert werden kann. Obgleich klar ist, dass diese Daten wahrscheinlich nicht uneingeschränkt auch automatisierte Fahrzeuge repräsentieren, da die Unfälle von menschlichen Fahrern verursacht wurden, werden sie für die Bewertung der Kritikalität von Fahrsituationen herangezogen.

Auf Grund fehlender Daten und Erfahrungswerte, können Aspekte wie die Eintrittswahrscheinlichkeit der Unfälle für automatisierte Fahrzeuge in der jeweiligen Situation bisher nicht bewertet werden. Die Risikoeinschätzung der Konflikte bezieht sich also insbesondere auf die Schwere der potenziell entstehenden Unfallfolgen.

Die Vergabe der Punkte für die Beantwortung der Prüfungsfragen in der theoretischen Führerscheinprüfung soll als weiteres Maß für die Kritikalität einer Situation dienen, in der die jeweilige Verkehrsregel anzuwenden ist. Für eine korrekt beantwortete Frage werden zwischen zwei und fünf Punkten vergeben. Eine höhere Punktzahl bedeutet eine höhere Wichtigkeit der Frage. Auch hierbei wurden bereits Faktoren in die Bewertung einbezogen, die auf das entstehende Risiko in der Situation hindeuten. So werden bei den Fragen nach der Bedeutung unterschiedlicher Verkehrszeichen beispielsweise Hinweisschilder nicht immer mit der gleichen Punktzahl bewertet. Für die korrekte Beantwortung der Frage nach dem Verhalten bei Vorhandensein eines Hinweisschildes auf eine Steigung oder ein Gefälle der Fahrbahn gibt es lediglich zwei Punkte, während für die Frage nach der Bedeutung des Hinweisschildes mit spielenden Kindern fünf Punkte vergeben werden. Bei der Vergabe der Punkte spielt offenbar eine Rolle, wie hoch der Schweregrad eines potenziell entstehenden Unfalls in einer solchen Situation wäre.

Es wird deutlich, dass auch in der Straßenverkehrsordnung bzw. im Fragebogenkatalog zu theoretischen Führerscheinprüfung, die die Straßenverkehrsordnung und Verhaltensnormen repräsentieren, bei der Beurteilung der Kritikalität die Betrachtung von möglichen Unfällen eine Rolle spielt. Sie können als ein Kriterium für die Bewertung der Kritikalität einer Situation herangezogen werden.

Wie zuvor erwähnt, kann durch die Ermittlung der anzuwendenden Verkehrsregeln auch identifiziert werden, welche Merkmale in der Situation von einem Fahrzeug detektiert werden müssen. Je höher die Anzahl der zu detektierenden Merkmale, desto höher die Anforderung an das System. Eine Situation, in der hohe Anforderungen an das System gestellt werden, kann als kritischer beurteilt werden, da die Qualität der Detektion entscheidend für die Entwicklung der Situation ist. Dieser Aspekt soll als weiteres Kriterium der Bewertung dienen.

Insgesamt umfasst die Bewertungsmetrik drei Dimensionen, zum einen soll die Relevanz der Verkehrsregeln auf Basis der Punktevergabe der entsprechenden Frage bewertet werden. Die Schwere der potenziell entstehenden Unfälle wird mit Hilfe der Unfalldaten bewertet. Außerdem soll die Komplexität der Situation als ein Kriterium herangezogen werden. Die Berechnung der entsprechenden Werte für die Beurteilung der Kritikalität wird im Folgenden erläutert.

Dimension 1: Relevanz der Verkehrsregel

Die erste Dimension der bewerteten Kritikalität geschieht auf Basis der Punktevergabe der Prüfungsfragen der theoretischen Fahrerlaubnisprüfung. Da die Anzahl der Punkte bei dem Wert Zwei beginnt, wird jeweils 1 von dieser Wertung abgezogen. Da in jeder Fahrsituation mehrere Verkehrsregeln relevant sein können, ergeben sich auch mehrere Ränge. Bei der Bewertung der Kritikalität in diesem Kriterium soll jedoch nur ein Wert pro Fahrsituation identifiziert werden, in diesem Fall wird das Maximum der Punkte verwendet. Somit wird jeweils die kritischste der in der Fahrsituation geltenden Verkehrsregeln berücksichtigt. Konnte keine Situationsklasse (Verkehrsregel) identifiziert werden, was beispielsweise der Fall ist, wenn frei gefahren werden kann, wird der Wert Null in der Bewertung vergeben.

$$Bewertung_{RelevanzRegel} = \begin{cases} \max(Punkte_{Situationsklasse}) - 1 & \text{wenn Regel vorhanden} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Dimension 2: Schweregrad potenzieller Unfallfolgen

Die Dimension der Kritikalität im Sinne der Unfallschwere wird auf Basis der in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Unfalldaten vorgenommen. Hierfür gibt es in den Unfalldaten die Einteilung der Unfallfolgen. Auch in diesem Fall werden fünf ordinal-skalierte Werte verwendet, die den Rang der Unfallfolgen bestimmen. Die folgenden Kategorien werden betrachtet:

- Rang 4 (R_G): Unfälle mit Getöteten (U_G)
- Rang 3 (R_{SV}): Unfälle mit Schwerverletzten (U_{SV})
- Rang 2 (R_{LV}): Unfälle mit Leichtverletzten (U_{LV})
- Rang 1 (R_S): Unfälle mit Sachschaden (U_S)
- Rang 0 (R_K): Kleinunfälle (U_K)

Von allen Unfalltypen, die durch das Data Matching der Fahrsituation zugeordnet wurden, wird aus den Unfalldaten der Testregion extrahiert, wie viele Unfälle des gleichen Unfalltyps mit den verschiedenen Folgen erfasst wurden. Diese Unfälle werden nach Unfallfolgen gruppiert aufsummiert. Dann wird ermittelt, wie groß die Anteile der verschiedenen Unfallfolgen an der Gesamtzahl der Unfälle (U) sind. Schließlich wird dieser relative Anteil mit dem Rang multipliziert. Daraus ergibt sich die Bewertung nach möglichen Unfallfolgen. Die niedrigste Bewertung kann also bei 0 liegen, was sich aus 100% der Unfallfolgen im Rang 0 ergäbe. Die höchste Bewertung mit dem größten Risiko ist die Bewertung mit der Zahl 4, die sich aus 100% Unfällen im Rang 4 ergäbe.

$$Bewertung_{Unfälle} = \frac{\sum U_G}{\sum U} * R_G + \frac{\sum U_{SV}}{\sum U} * R_{SV} + \frac{\sum U_{LV}}{\sum U} * R_{LV} + \frac{\sum U_S}{\sum U} * R_S + \frac{\sum U_K}{\sum U} * R_K$$

Dimension 3: Komplexität der Situation

Als drittes Kriterium zur Bewertung der Kritikalität dient die Komplexität. Laut Duden bedeutet komplex „viele verschiedene Dinge umfassend“ [DUDENREDAKTION o.J.a]. In Bezug auf eine Fahrsituation kann die Komplexität dadurch bestimmt werden, wie viele verschiedene Objekte in einer Fahrsituation erkannt werden müssen, um angemessen reagieren zu können. Dafür werden wiederum die Situationsklassen verwendet. Bei der Bestimmung der Fahrsituationsklassen, die die Verkehrsregeln darstellen, wurde, insbesondere für die Zuordnung von Fahrsituationen zu Verkehrsregeln, das Attribut Relevanz zur Situationsbeschreibung hinzugefügt. Um zu bestimmen, wie komplex eine Situation ist, werden nun die relevanten Objekte, also die Objekte die erkannt werden müssen, identifiziert. Hierfür wird erneut die Situationsdatenbank abgefragt. Für die Auswertung der Regeln, die bestimmen, ob eine bestimmte Verkehrsregel in der Situation gültig ist, werden auch weitere Eigenschaften der Objekte benötigt. Beim Aufstellen des Fuzzy Systems wurden diese identifiziert, da für sie jeweils eigene Funktionen bestimmt werden mussten. Die Summe der zu erkennenden Eigenschaften der relevanten Objekte in der Situation bestimmt die Komplexität. Auch diese Bewertung soll auf Werte zwischen 0 und 4 normiert werden. Hierfür muss ein Maximum zu erkennender Merkmale definiert werden. Das können beispielsweise bekannte kapazitative Grenzen der Sensorik sein. Die folgende Formel wird für die Bewertung angewendet, wobei im vorliegenden Fall aus der Analyse mehrerer Beispiele 25 als Maximum der zu erkennenden relevanten Objektattribute gewählt wurde.

$$Bewertung_{Komplexität} = \frac{\sum \text{relevanteObjektattribute}_{situation} * 4}{\max(\text{relevanteObjektattribute}_{alle})}$$

Mit diesen Kriterien werden wichtige Dimensionen der Kritikalitätsbeurteilung wiedergespiegelt. Zur Visualisierung von mehrdimensionalen Bewertungen eignet sich ein Netz- oder Spinnendiagramm, welches die verschiedenen Dimensionen abbilden kann. Im Mittelpunkt des Netzes befinden sich die jeweils besten Bewertungen der Kategorien. Je größer die Fläche wird, die sich ergibt, wenn die Punkte der Bewertungen in die verschiedenen Richtungen des

Netzes verbunden werden, desto kritischer ist die Situation zu bewerten. Auf den drei Achsen werden die zuvor beschriebenen Bewertungskriterien dargestellt.

Mit Hilfe eines solchen Diagramms können auch mehrere Situationen miteinander verglichen werden. So ist erkenntlich, dass die Fläche kleiner wird, wenn die Indikatoren der einzelnen Bewertungsfaktoren niedriger werden. Die Fläche des Diagramms wird größer, je kritischer eine Situation beurteilt wird. Die verwendeten Dimensionen werden in diesem Fall alle gleich gewichtet. Es ist jedoch auch vorstellbar, verschiedene Dimensionen unterschiedlich zu gewichten. Das kann beispielsweise durch eine andere Normierung einzelner Dimensionen oder das Anwenden einer Gewichtungsfunktion geschehen.

Mit dieser Methodik können nun auch verschiedene Fahrsituationen miteinander verglichen werden. Im folgenden Kapitel 6.3 wird dies auf Beispielsituationen angewendet und diskutiert.

6.3 Anwendung der Bewertungsmethodik auf exemplarische Fahrsituationen

Die zuvor vorgestellte Bewertungsmethodik wird nun auf exemplarische Fahrsituationen aus den Fahrdaten des Testgebietes angewandt. Hierfür werden erneut die bereits im Kapitel 5.2 vorgestellten Situationen verwendet, die in Abbildung 6.1 dargestellt sind.

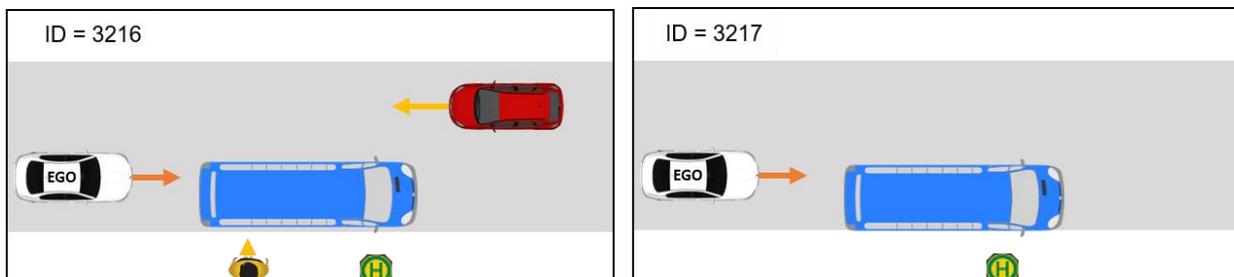


Abbildung 6.1: Zwei Beispielsituationen, die mittels der Kritikalitätsmetrik miteinander verglichen werden sollen

Beide Situationen verlangen von den Fahrzeugführern besondere Vorsicht, da ein Bus an einer Haltestelle gehalten hat, an dem nur mit besonderer Vorsicht vorbeigefahren werden darf. In der Situation mit der ID 3216 befindet sich neben dem Bus an der Haltestelle auch ein Fußgänger in der Szene. Zusätzlich gibt es Gegenverkehr auf der Fahrbahn, der es nicht erlaubt, am Bus vorbeizufahren. Die Vorstellung der geltenden Regeln und der angemessenen Fahrstrategie wurden bereits in Kapitel 5.2 genannt. Zusätzlich wurde das Data Matching mit den Unfallsituationen des Unfalltypenkatalogs durchgeführt.

Die folgende Abbildung 6.2 zeigt das Netzdiagramm mit der Bewertung für beide Situationen. Es zeigt sich, dass die Kategorie der Relevanz der Verkehrsregeln für beide Situationen den gleichen Wert haben. Das Problem der wenig differenzierten Bewertung wurde bereits in Ka-

pitel 5.2 genannt. Auch in diesem Fall wurden für beide Situationen Fragen aus den Fragebogenkatalog identifiziert, die mit der höchsten Wertung 5 bewertet werden. Diese Wertung wird insbesondere vergeben, wenn die Möglichkeit besteht, dass Personen gefährdet werden oder Fragen zu Vorrang und Vorfahrt geklärt werden müssen. Da es sich bei dem Bus um einen besonderen Verkehrsteilnehmer mit gewissen Sonderrechten handelt und besonders an Haltestellen auch immer mit Personen zu rechnen ist, ist diese Wertung auch sinnvoll.

Auch die Wertung der Dimension Unfallfolgen ist in beiden Situationen ähnlich. Das ergibt sich insbesondere daraus, dass zwar bei Vorhandensein von verletzlichen Verkehrsteilnehmern Unfälle mit schwerwiegenderen Folgen entstehen können, als Datenbasis wurden für diese Auswertung jedoch nur die Unfalldaten des Testgebietes verwendet, wo solche Unfälle kaum stattfanden. Eine Erweiterung der Datenbasis auf mehr Unfälle kann sinnvoll sein, wenn verschiedenste Situationen unterschiedlicher Gebiete analysiert werden sollen.

In der Dimension der Komplexität wird der Unterschied der beiden Situationen deutlich. Es ist erkennbar, dass in der Situation mit der ID 3216 mehr Objekte und deren Attribute erkannt werden müssen, was eine Herausforderung für Fahrer bzw. automatisierte Fahrzeuge und deren Sensorik darstellen kann. Außerdem sind solche Messwerte häufig ungenau, wodurch es zu mehr Fehlern kommen kann.

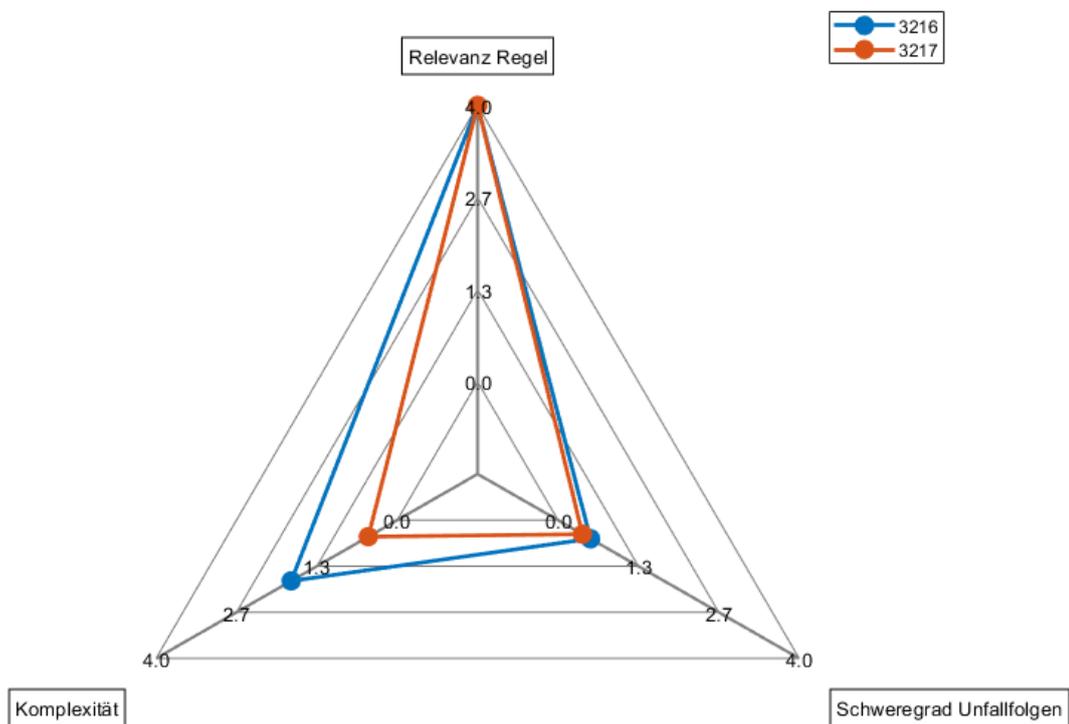


Abbildung 6.2: Netzdiagramm zur Bewertung der Kritikalität der beiden Beispielsituationen und deren Vergleich

Auch die mögliche Entwicklung von einer Situation zu einer anderen und die damit einhergehende Änderung der Kritikalität kann durch das Vorgehen visualisiert werden. In diesem Fall

könnte beispielsweise die Situation 3216 vorgefunden worden sein. Wie in der Fahrstrategie vorgesehen, wurde dann gehalten. Im Folgenden könnte das Fahrzeug des Gegenverkehrs vorbeigefahren und der Fußgänger in den Bus eingestiegen sein, woraus sich Situation 3217 ergab. Aus dem Netzdiagramm wird ersichtlich, dass sich in Folge dessen die Kritikalität der Fahrsituation reduziert.

6.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Dieses Kapitel beinhaltet eine Bewertung der Kritikalität verschiedener Fahrsituationen. Es wurde gezeigt, dass die Definition des Begriffs Kritikalität selbst nicht eindeutig ist. Obgleich kritische Fahrsituationen ein Thema in Standards und vielen Forschungsarbeiten sind, gibt es kein einheitliches Bewertungsschema für die Kritikalität von Fahrsituationen. Für diese Arbeit wurde die Kritikalität als Maß dafür definiert, wie hoch das Potenzial in einer Situation für eine gefährliche Entwicklung der Situation ist. Zur Bewertung der Kritikalität wurden drei Kriterien herangezogen. Aus der Analyse der zu betrachtenden Objekte und deren Eigenschaften, die relevant für das Einhalten der Verkehrsregeln sind, wird die Bewertung der Komplexität einer Situation abgeleitet. Aus der Punktevergabe für die geltenden Verkehrsregeln wurde die Kritikalitätsbewertung der entsprechenden Situation, in der die Regel anzuwenden ist, extrahiert. Außerdem wurde die Schwere der möglichen Unfallfolgen, die sich aus der Situation ergeben könnten, ermittelt. Dies geschieht auf Basis der Verkehrsunfalldaten, die für diese Arbeit zur Verfügung standen.

Die Bewertung dient dazu, verschiedene Situationen miteinander zu vergleichen. Als alleiniger Wert ist die Bewertung nicht aussagekräftig, doch aus dem Vergleich mit anderen Situationen können relevante Schlussfolgerungen gezogen werden. So kann beispielsweise auf Basis des Wissens über die Kritikalitätseinstufung der verschiedenen Situationen eine Verhaltensweise gewählt werden, die diese Kritikalität minimiert, indem beispielsweise kritischer bewertete Situationen vermieden werden. Es ist ebenso denkbar, dass die Bewertung dazu genutzt wird, ein weiteres Kriterium für die Entscheidung der Durchführung eines gewissen, evtl. mit Risiko behaftetem, Manövers durchzuführen. Weiterhin kann die Bewertung dazu verwendet werden, in manchen Situationen eine erhöhte Aufmerksamkeit zu fordern. Auf automatisierte Fahrzeuge bezogen, könnte dies beispielsweise durch eine Erhöhung der Abfragerate der Sensordaten für bestimmte Informationen realisiert werden. Auch könnte für automatisierte Fahrzeuge, die einen abgegrenzten Anwendungsfall (ODD) haben, eine Kritikalitätsbewertung dazu dienen, zu bestimmen, ob die Fahraufgabe an einen Fahrer zurückgegeben werden sollte.

7. Zusammenfassung, kritische Würdigung und Ausblick

Die Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, das Fahren im urbanen Raum besser zu verstehen und die Entwicklung des automatisierten Fahrens für den urbanen Verkehr zu unterstützen. In diesem Kapitel werden zunächst in Kapitel 7.1 die Beiträge, die diese Arbeit leistet, noch einmal zusammengefasst und die zu Beginn der Arbeit gestellten Forschungsfragen aufgegriffen. Die Arbeit und die darin gewählte Methodik lässt manche Aspekte unbeantwortet und hat naturgemäß einige Limitationen. Darauf wird im Kapitel 7.2 eingegangen, in dem die Beiträge nochmals kritisch gewürdigt werden. Das Kapitel 7.3 beinhaltet einen Ausblick, in dem insbesondere Hinweise gegeben werden, welche Punkte weiterhin offen bleiben und wie auf Grundlage der vorliegenden Arbeit weiter an der Entwicklung und Zulassung des automatisierten Fahrens für den urbanen Verkehr gearbeitet werden kann.

7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Fragestellung, wie automatisierte Fahrzeuge regelkonform und Gefahren berücksichtigend im städtischen Verkehr fahren können. Hierbei sollte zunächst die Frage beantwortet werden, wie Fahrsituationen des urbanen Raums umfassend und einheitlich beschrieben werden können. Der erste Teil der Arbeit beinhaltet eine umfangreiche Datenerfassung mittels Befahrungen in Testgebieten sowie einer Recherche von Fahrsituationen die Verkehrsregeln und Verkehrskonflikte darstellen. Ein eigens entwickeltes Datenbankformat bringt diese drei Datenquellen zusammen und beschreibt alle Datenquellen in gleicher Art und Weise. Somit wird eine umfangreiche Wissensbasis für Verkehrsregeln und Konfliktsituationen im urbanen Verkehr bereitgestellt. Darin sind die wesentlichen Merkmale definiert, um in einer Fahrsituation relevante Verkehrsregeln und Konflikte zu identifizieren. Ein Datensatz von über 2800 Fahrsituationen aus Befahrungen verschiedener Testgebiete zeigt die Anwendbarkeit auf reale Beispiele von Fahrsituationen im urbanen Verkehr.

Regelkonformes Verhalten wird in dieser Arbeit als das Berücksichtigen der korrekten Verkehrsregeln der deutschen Straßenverkehrsordnung definiert. Die einzelnen Regeln sind innerhalb der Datenbasis als Situationsklassen definiert. Der Fragenkatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung, insbesondere solche Fragen, die zur Manöverplanung relevant sind, dient dazu als Grundlage. Durch eine gezielte Aufteilung und Erweiterung der Fragen kann aus den resultierenden Situationsklassen, die in der Datenbank vorhanden sind, jeweils ein korrektes Verhalten für das Ego-Fahrzeug identifiziert werden.

Beim Fahren im urbanen Verkehr kann es eine Vielzahl an Gefahren geben. Diese Arbeit beschränkt sich auf Gefahren im Sinne von Konflikten, die zwischen dem Ego-Fahrzeug und umgebenden Verkehrsteilnehmern auftreten können. Der Unfalltypenkatalog des GDV bietet eine umfassende Liste möglicher Konflikte zwischen Verkehrsteilnehmern und beschreibt die

verschiedenen möglichen Konstellationen und Rahmenbedingungen. In der entwickelten Wissensbasis sind auch diese Konflikte in der strukturierten Beschreibungsform aufbereitet und erfasst.

Um konkret zu definieren, welches Fahrverhalten in den einzelnen Situationen regelkonform ist und welche Konflikte jeweils bestehen, werden die entsprechenden Situationen mit Hilfe eines Klassifikationsverfahrens zugeordnet. Durch die einheitliche Beschreibungsform in der Datenbank und die Identifikation der jeweils entscheidungsrelevanten Merkmale, kann eine Klassifikation der Fahrsituationen zu den Situationsklassen der Verkehrsregeln sowie zu den Konflikten durchgeführt werden. Als Ergebnis kann für jede Fahrsituation erkannt werden, welche Verkehrsregeln prinzipiell auf Grund der Analyse der Szene gelten könnten und zu welchen Unfällen die Fahrsituation führen könnte.

Allein aus der Klassifikation der Fahrsituationen zu den Situationsklassen der Verkehrsregeln, kann nicht eindeutig eine Handlungsempfehlung für das Fahrzeug in der Situation gegeben werden. Hierfür ist die detailliertere Bestimmung einiger Merkmale notwendig. Das können beispielsweise dynamische Informationen, wie Relativgeschwindigkeiten zwischen den Verkehrsteilnehmern sein. Solche Informationen sind in den Verkehrsregeln meist nicht präzise formuliert oder quantifiziert, sondern werden durch unscharfe Mengen ausgedrückt. Dem Umgang mit unscharfen Mengen widmet sich die Fuzzylogik. Sie macht es Maschinen möglich, Entscheidungen auf Basis linguistischer Eingabevariablen zu treffen. Ein entsprechendes Entscheidungsunterstützungssystem auf Basis der Fuzzylogik wird in dieser Arbeit für die Handlungsplanung der Fahraufgaben automatisierter Fahrzeuge im städtischen Verkehr vorgeschlagen und beispielhaft aufgebaut. Für die Formulierung der Regelbasis bedient es sich der Verkehrsregeln. Als Ergebnis wird für jede Fahrsituation, nach Auswertung der entsprechenden Informationen, eine Fahrstrategie für das Ego-Fahrzeug identifiziert. Daraus lässt sich auch ableiten, welche Informationen für das Fahrzeug erfassbar sein müssen.

Aus den Klassifikationen und der Identifikation der Verkehrsregeln kann nun auch eine Fahrsituation beurteilt werden. Dabei stellte sich die Frage, wie kritisch eine Situation im Vergleich zu anderen ist. Es wird eine Methodik vorgestellt, die diesen Vergleich auf Basis der verschiedenen Datenquellen dieser Arbeit erlaubt. Das sind einerseits die Verkehrsunfalldaten des Testgebietes, die in Form des Unfalltypenkatalogs vorliegen, der auch zum Erkennen der Konflikte verwendet wurde. Außerdem werden auch Indikatoren auf Basis der identifizierten Verkehrsregeln zur Beurteilung der Kritikalität herangezogen. Da die Fragen aus dem Fragebogenkatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung jeweils eine Punktwertung beinhalten, kann die Relevanz der Frage geschlussfolgert werden. Höher gewichtete Fragen beinhalten kritischere Fahrsituationen. Zusätzlich geben die Situationsklassen Aufschluss über die zu identifizierenden Elemente einer Situation, die nötig sind, um angemessen handeln zu können. Je mehr Attribute dabei relevant sind, desto höher die Anforderungen an die Fahrzeugsensorik und desto höher die Komplexität der Situation. Auch die Komplexität dient als Dimension der Kritikalität einer Fahrsituation. Aus der Gesamtheit aller Kriterien ergibt sich

eine multidimensionale Bewertung der Kritikalität von Fahrsituationen, die einen Vergleich verschiedener Fahrsituationen zueinander erlaubt.

7.2 Kritische Würdigung

In der Arbeit wird ein Beitrag zum Situationsverständnis für urbane Fahrsituationen geleistet. Insbesondere die Situationserkennung und -interpretation sowie die Handlungsentscheidung für das Fahrverhalten wird adressiert. Die darauffolgenden Aufgaben der Manöverplanung, die aus einer Pfad- und einer Trajektorienplanung besteht, bedürfen allerdings noch weiterer Informationen und genauerer Daten. Außerdem werden einige Aspekte in der Verhaltensentscheidung explizit nicht betrachtet. Dazu zählt beispielsweise die Anpassung des Fahrverhaltens bei verschiedenen Witterungsbedingungen.

Das Vorgehen kann nicht nur in der Entwicklung von Fahrfunktionen des automatisierten Fahrens für den städtischen Verkehr Verwendung finden, sondern auch für die Zertifizierung im Zulassungsprozess solcher Systeme herangezogen werden. Aus der Literatur wird deutlich, dass es aktuell keine praktikablen Lösungen für die Zulassung vollautomatisierter Fahrzeuge für öffentliche Straßen in Deutschland gibt. Das entwickelte Vorgehen zur Annotation der Situationen und der Verhaltensentscheidung auf Basis linguistischer Variablen, kann auch für solch einen Prozess hilfreich sein. Allerdings sind auch weitere Prüfungen notwendig. Mit dem in dieser Arbeit gezeigten Vorgehen, kann die Entscheidungsfindung eines automatisierten Fahrzeugs überprüft und plausibilisiert werden. Das geschieht in einer Form ähnlich zum theoretischen Führerscheintest bei menschlichen Fahrern. Ein Vorteil daran ist, dass besondere Situationen virtuell abgeprüft werden können, ohne dass reale Fahrten durchgeführt werden müssen, bei denen die Situationen vorkommen. Es ist jedoch zu beachten, dass der Fragebogenkatalog auf Basis langjähriger Erfahrung zusammengestellt wurde. Um solche besonderen Situationen auch für automatisierte Fahrzeuge zu identifizieren, fehlen bisher Daten, da sich solche Fahrzeuge noch in der Entwicklung befinden. Es ist durchaus denkbar, dass ein angepasster Situationskatalog auch für automatisierte Fahrzeuge entwickelt werden kann, wenn die für diese Fahrzeuge kritischen Situationen umfassend beschrieben werden können.

In den Betrachtungen dieser Arbeit wird stets davon ausgegangen, dass die Fahrzeugsensorik jeweils in der Lage ist, die umgebenden Objekte zu erkennen, zu klassifizieren und relevante Merkmale, wie beispielsweise die Geschwindigkeit oder den Abstand, zu messen. In diesem Schritt gibt es jedoch häufig noch erhebliche Unsicherheiten. Die Sensorik automatisierter Fahrzeuge ist nicht ohne Fehler und es bestehen hohe Anforderungen an die Erkennung. Das Absichern der Sensorinformationen wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, gehört allerdings zu den notwendigen Schritten, um die vorgestellte Methodik anzuwenden.

Eine weitere Einschränkung der vorgestellten Anwendung ist die Limitation auf die deutschen Verkehrsregeln der Straßenverkehrsordnung. In anderen Ländern, in denen andere Regeln gelten, müssten auch diese wiederum in Regeln bzw. Situationsklassen definiert werden. Getestet wurde das Verfahren nur mit Daten aus den Testgebieten in der Münchener Innenstadt

und einem Gebiet außerhalb Münchens. Das Vorgehen ist jedoch auf einen anderen Kontext, wie zum Beispiel ein anderes Land mit anderen Verkehrsregeln oder eine andere Stadt, sowie auch Situationen außerhalb der Stadt übertragbar.

Das Vorgehen basiert auf definierte Verkehrsregeln, die konkret in Wenn-Dann Formulierungen gefasst werden. Durch die hohe Komplexität des Problems und die Vielzahl an verschiedenen Fahrsituationen, die es im städtischen Verkehr geben kann, gibt es den Trend weg von der Nutzung klassischer, regelbasierter Programme hin zur Nutzung von künstlicher Intelligenz. Immer häufiger werden maschinelle Lernverfahren angewendet, die aus Daten, wie beispielsweise Beobachtungen von Fahrverhalten, lernen sollen und damit eigenständig Logiken extrahieren und folglich aus dem Gelernten eigene Verhalten ableiten können. Eines der größten Probleme dieser Verfahren ist der große Bedarf an annotierten Daten. Eine gewisse Regelbasis, wie die durch die StVO vorhanden ist und in dieser Arbeit verwendet wurde, kann hilfreich dabei sein, auch seltene Situationen abzudecken die in Beobachtungen evtl. gar nicht vorkommen.

7.3 Ausblick

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des automatisierten Fahrens, ergibt sich eine Vielzahl an Forschungsfragen, die noch unbeantwortet bleiben. Insbesondere beinhaltet das Fahren im städtischen Verkehr eine Vielzahl besonderer Situationen, die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern voraussetzt, den Umgang mit Verkehrsteilnehmern, die sich nicht an Verkehrsregeln halten, fordern oder eine Anpassung des Fahrverhaltens bedürfen, um den Verkehr effizient fließend zu halten. Automatisierte Fahrzeuge werden noch eine lange Zeit gemeinsam mit menschlichen Verkehrsteilnehmern im Stadtverkehr fahren müssen, sofern keine Gebiete ausschließlich für solche Fahrzeuge freigegeben werden. Das bedeutet auch, dass menschliche Fahrverhaltensweisen in die Verhaltensplanung einbezogen werden müssen.

In einigen Forschungsarbeiten wird vorgeschlagen, automatisierten Fahrzeugen das Fahren nur in abgeschlossenen Gebieten, in denen keine konventionellen Fahrzeuge verkehren, zu erlauben. Somit bedarf es keiner Anpassung an das menschliche Fahrverhalten und die automatisierten Fahrzeuge können sich stets abstimmen, was nicht nur die Sicherheit, sondern ebenso die Effizienz des Verkehrsflusses steigern könnte. Eine Umsetzung erscheint jedoch aus heutiger Sicht nicht nur aus kosten- und akzeptanzgründen in weiter Ferne, sondern insbesondere auch auf Grund der ungeklärten Haftungs- und Zulassungsfragen.

Aus den noch ungeklärten Haftungs- und Zulassungsfragen wird auch der Bedarf der Formalisierung der Verkehrsregeln deutlich. Das hilft nicht nur bei der Entwicklung der automatisierten Fahrfunktionen, sondern ebenso bei den Testverfahren zur Zulassung dieser Fahrzeuge für öffentliche Straßen. Gerade an solchen Verfahren wird an vielen Stellen geforscht. Es werden bereits neue Impulse gesetzt, wie ein virtueller Test und eine virtuelle Absicherung durchgeführt werden können.

Viele aktuelle Forschungsarbeiten im Rahmen der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen beschäftigen sich insbesondere mit maschinellen Lernverfahren und künstlicher Intelligenz. In der Zulassung von solchen Systemen ergeben sich jedoch dadurch Schwierigkeiten, dass die Entwickler nicht jedes Verhalten, welches das System auf Basis des Gelernten aufzeigt, begründen oder nachvollziehen können. Das stellt nicht nur eine Herausforderung in der Entwicklung und im Versuch dar, ebenso ist ungeklärt, wie solche Systeme freigegeben werden können. Die formalen Prozesse der Zulassung verlangen einen Nachweis der Sicherheit und Verkehrstauglichkeit der Systeme. Ein hybrider Ansatz, der die Vorteile von künstlicher Intelligenz und regelbasierten Verfahren kombiniert scheint daher sinnvoll, um sowohl den Anforderungen der Entwicklung von Fahrfunktionen als auch der Zertifizierung gerecht zu werden.

Es lässt sich schließen, dass noch einiger Forschungsbedarf besteht, um vollautomatisiertem Fahren im urbanen Verkehr umfassend und sicher einsetzen zu können. Die vorliegende Arbeit leistet insbesondere einen Beitrag zum Verständnis von Fahrsituationen und -aufgaben im urbanen Verkehr.

Literaturverzeichnis

- AEBERHARD, MICHAEL; RAUCH, SEBASTIAN; BAHRAM, MOHAMMAD; TANZMEISTER, GEORG; THOMAS, JULIAN; PILAT, YVES ET AL. [2015]: Experience, Results and Lessons Learned from Automated Driving on Germany's Highways. In: *IEEE Intelligent transportation systems magazine* (Spring 2015), S. 42–57.
- AMUNDSON, F.; HYDÉN, C. [1977]: A Traffic-Conflicts Technique for Examining Urban Intersection Problems. In: *First Workshop on Traffic Conflicts, Oslo 1977*.
- ASSADI, HAMID; EMMERICH, HEIKE [2013]: Intelligent driving in traffic systems with partial lane discipline. In: *Eur. Phys. J. B* 86 (4), S. 4030. DOI: 10.1140/epjb/e2013-30511-0.
- BAGSCHIK, GERRIT; MENZEL, TILL; RESCHKA, ANDREAS; MAURER, MARKUS [2017]: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen. 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren. Walting, 2017.
- BELL, MICHAEL G. H.; BUSCH, FRITZ; MIEDEN, THOMAS; SAYERS, TESSA [1996]: Verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung mit Fuzzy-Logik - ein modulares, praxisorientiertes Verfahren. In: *Straßenverkehrstechnik* 10/96, S. 485–489.
- BENDA, HELGA von; HOYOS, CARL Graf; SCHAIBLE-RAPP, AGNES [1983]: Klassifikation und Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen. Bericht zum Forschungsprojekt FP 7320 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.).
- BOGENBERGER, KLAUS [2001]: Adaptive Fuzzy Systems for Coordinated Traffic Responsive Ramp Metering: Dissertation an der Technischen Universität München.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG [2010]: Fahrerlaubnis-Verordnung. FeV, vom 13.12.2010 (BGBl. I S. 1980), die zuletzt durch Artikel 4 der Verordnung vom 20.04.2020 (BGBl. I S. 814) geändert worden ist.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG [2012]: Fahrschüler-Ausbildungsordnung, vom 19.06.2012 (BGBl. I S. 1318), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 02.10.2019 (BGBl. I S. 1416) geändert worden ist.
- BUNDESMINISTERIUMS DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: Straßenverkehrs-Ordnung. StVO, vom 06.03.2013 (BGBl. I S. 367), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 20.04.2020 (BGBl. I S. 814) geändert worden ist.
- BUSCH, F; CREMER, M; GHIO, A; HENNINGER, T [1994]: A multi-modal approach with fuzzy reasoning for traffic state estimation and incident detection on motorways. In: *Proceedings of the first world congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems* (3), S. 1245–1252.
- BUSCH, F; GHIO, A [1994]: Automatic incident detection on motorways by fuzzy logic. In: *Proc. Traffic and Transport Solutions*.

- CHRISTEN, PETER [2012]: Data Matching. Concepts and Techniques for Record Linkage, Entity Resolution, and Duplicate Detection. Berlin, Heidelberg: Springer (Data-Centric Systems and Applications). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10582544>.
- CZARNECKI, KRZYSZTOF [2018]: Operational Design Domain for Automated Driving Systems. Taxonomy of Basic Terms. WATERLOO INTELLIGENT SYSTEMS ENGINEERING (WISE) LAB. Waterloo, Canada.
- DARMS, MICHAEL [2015]: Fusion umfelderfassender Sensoren. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- DATE, CHRIS J. [2004]: An introduction to database systems. 8. ed., international ed. Boston, Mass.: Pearson Addison-Wesley.
- DIETMAYER, KLAUS [2015]: Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren. In: Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H. (Hrsg.) Autonomes Fahren: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 419–438.
- DIETMAYER, KLAUS; NUß, DOMINIK; REUTER, STEPHAN [2015]: Repräsentation fusionierter Umfelddaten. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- DOMSCH, C.; NEGELE, H. [2008]: Einsatz von Referenzfahrsituation bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München, 2008.
- DONGES, EDMUND [1982]: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie* (Nr. 2), S. 183–190.
- DONGES, EDMUND [2015]: Fahrerverhaltensmodelle. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz und Christina Singer (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage: Springer, S. 17–26.
- DORNIER CONSULTING INTERNATIONAL [2017]: Autonomes Fahren Erwartungen an die Mobilität der Zukunft.
- DUDENREDAKTION [o.J.a]: "komplex" auf Duden online. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/komplex>, zuletzt geprüft am 06.06.2020.
- DUDENREDAKTION [o.J.b]: "kritisch" auf Duden online. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/kritisch>, zuletzt geprüft am 06.06.2020.
- EBNER, ADRIAN; HELMER, THOMAS; SAMAHA, RANDA RADWAN; SCULLION, PAUL [2011]: Identifying and Analyzing Reference Scenarios for the Development and Evaluation of Active Safety. Application to Preventive Pedestrian Safety. In: *Int. J. ITS Res.* 9 (3), S. 128–138. DOI: 10.1007/s13177-011-0035-z.

- EFFERTZ, JAN [2009]: Autonome Fahrzeugführung in urbaner Umgebung durch Kombination objekt- und kartenbasierter Umfeldmodelle. Dissertation.
- ERKE, HEINER; GSTALTER, HERBERT [1985]: Verkehrskonflikttechnik. Handbuch für die Durchführung und Auswertung von Erhebungen (Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, 52).
- FÄRBER, BERTHOLD [2015]: Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern. in Maurer et al. (Hrsg.) *Autonomes Fahren*, 2015.
- FASTENMEIER, WOLFGANG [1994]: Verkehrstechnische und verhaltensbezogene Merkmale von Fahrstrecken - Entwicklung und Erprobung einer Typologie von Straßenverkehrssituationen. Online verfügbar unter [http://opac.ub.tum.de/InfoGuideClient.tumsis/start.do?Login=wotum&Query=10="BV009725146"](http://opac.ub.tum.de/InfoGuideClient.tumsis/start.do?Login=wotum&Query=10=).
- FASTENMEIER, WOLFGANG [1995]: Autofahrer und Verkehrssituation. Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Strassenverkehrssysteme. Köln: Verl. TÜV Rheinland u.a (Mensch, Fahrzeug, Umwelt, Bd. 33).
- FASTENMEIER, WOLFGANG; GSTALTER, HERBERT [2007]: Driving Task Analysis as a Tool in Traffic Safety Research and Practice. In: *Safety Science* (45), S. 952–979.
- FORM, THOMAS [2017]: Standardization Efforts on Autonomous Driving Safety Barely Under Way. In: *The Hansen Report on Automotive Electronics 2017* (February 2017).
- FUCHS, HENDRIK; HOFMANN, FRANK; LÖHR, HANS; SCHAAF, GUNTHER [2015]: Car-2-X. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- GASSER, TOM M.; ARZT, CLEMENS; AYOUBI, MIHIAR; BARTELS, ARNE; EIER, JANA; FLEMISCH, FRANK ET AL. [2012]: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Bergisch Gladbach (Forschung kompakt Fahrzeugtechnik, Heft F 83).
- GDV UNFALLFORSCHUNG DER VERSICHERER [2016]: Unfalltypen-Katalog.
- GETTMAN, DOUGLAS; PU, LILI; SAYED, TAREK; SHELBY, STEVE [2008]: Surrogate Safety Assessment Model and Validation. Final Report.
- GEYER, SEBASTIAN; BALTZER, MARCEL; FRANZ, BENJAMIN; HAKULI, STEPHAN; KAUER, MICHAELA; KIENLE, MARTIN ET AL. [2014]: Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance. In: *IET Intelligent Transport Systems* 8 (3), S. 183–189. DOI: 10.1049/iet-its.2012.0188.
- GOEBL, MATTHIAS; ALTHOFF, MATTHIAS; BUSS, MARTIN; FAERBER, GEORG; HECKER, FALK; HEIßING, BERND ET AL. [2008]: Design and capabilities of the Munich cognitive automobile. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*,, S. 1101–1107.

- GOTZIG, HEINRICH; GEDULD, GEORG [2015]: LIDAR-Sensorik. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- GREWE, RALPH; HOHM, ANDREE; LÜKE, STEFAN; WINNER, HERMANN [2014]: Umfeldmodelle – standardisierte Schnittstellen für Assistenzsysteme. Siebenpfeiffer (Hg.) 2014 – Vernetztes Automobil, ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- HEALD, GRAEME [2018]: Issues with Reliability of Fuzzy Logic.
- HEIGELE, C.; MIELENZ, H.; HECKEL, J.; SCHRAMM, D. [2015]: Effiziente Umfeldmodellierung für Fahrerassistenzsysteme im Niedergeschwindigkeitsbereich. In: Proff H. (eds) Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität. Wiesbaden: Springer Gabler.
- HOBBS, C. ADRIAN; MCDONOUGH, PAUL J. [1998]: Development of the European new car assessment programme (Euro NCAP): Transport Research Laboratory.
- HOFFMANN, SILJA [2014]: Mikroskopische Modellierung und Bewertung von verkehrssicherheitskritischen Situationen. Am Beispiel kommunikationsbasierter Fahrerwarnungen auf Autobahnen. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2013. München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik Techn. Univ (Schriftenreihe / Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, 19).
- HUBMANN, CONSTANTIN; AEBERHARD, MICHAEL; STILLER, CHRISTOPH [2016]: A generic driving strategy for urban environments. In: *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, S. 1010–1016. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795679.
- JOHNSON, LEIF; FITZSIMMONS, MICHELLE [2018]: Uber self-driving cars: everything you need to know. Hg. v. Techradar. Online verfügbar unter <https://www.techradar.com/news/uber-self-driving-cars>, zuletzt geprüft am 14.03.2019.
- JÜRGENS, LUDGER [2018]: Autonome Kleinbusse und ihre Rolle im ÖPNV - heute und morgen. Kooperationsforum TechROAD Autonomer eBus. bayern innovativ. Bad Birnbach, 10.04.2018.
- KALISVAART, SYTZE [2016]: Scenario identification for the assessment of automated driving functions. AMAA. Berlin, 2016.
- KHANH, TRAN QUOC; HUHN, WOLFGANG [2015]: Sichtverbesserungssysteme. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz und Christina Singer (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch), S. 815–839.
- KLANNER, FELIX; RUHHAMMER, CHRISTIAN [2015]: Backendsysteme zur Erweiterung der Wahrnehmungreichweite von Fahrerassistenzsystemen. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

- KRAUSE, SABINE [2015]: Applicability of Traffic Simulation as Contribution to the Development of Driver Assistance Systems: Master's Thesis an der Technischen Universität München.
- KRAUSE, SABINE; MOTAMEDIDEHKORDI, NASSIM; HOFFMANN, SILJA; BUSCH, FRITZ; HARTMANN, MARTIN; VORTISCH, PETER [2017]: Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. Hg. v. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT Schriftenreihe, Heft 296).
- KRZIKALLA, ROLAND; SCHINDLER, ANDREAS; WANKERL, MATTHIAS; WERTHEIMER, REINER [2014]: Mehr Sicherheit durch Positionsbestimmung mit Satelliten und Landmarken. In: W. Siebenpfeiffer (Hrsg.), *Vernetztes Automobil*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- LEITNER, ANDREA [2016]: ENABLE-3S Project Abstract: European Initiative to Enable Validation for Highly Automated Safe and Secure Systems 2016.
- MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. [1975]: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 7 (1), S. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
- MATAWA, R. [2018]: Herausforderungen bei der Zulassung automatisiert-fahrender People-Mover. TechROAD Autonomer Bus. Bad Birnbach, 2018.
- MATHWORKS INC. [2020]: Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. Online verfügbar unter https://de.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy_ug.pdf, zuletzt aktualisiert am 26.06.2020.000Z, zuletzt geprüft am 26.06.2020.
- MATTHAEI, RICHARD; RESCHKA, ANDREAS; RIEKEN, JENS; DIERKES, FRANK; ULBRICH, SIMON; WINKLE, THOMAS; MAURER, MARKUS [2015]: Autonomes Fahren. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- MICHELS, KAI; KRUSE, RUDOLF; KLAWONN, FRANK; NÜRNBERGER, ANDREAS [2002]: Fuzzy-Regelung. Grundlagen, Entwurf, Analyse. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- MIRCHEVSKA, BRANKA; PEK, CHRISTIAN; WERLING, MORITZ; ALTHOFF, MATTHIAS; BOEDECKER, JOSCHKA [2018]: High-level Decision Making for Safe and Reasonable Autonomous Lane Changing using Reinforcement Learning. In: *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- MÖRBE, MATTHIAS [2015]: Fahrdynamikensensoren für FAS. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- MTL INSTRUMENTS GROUP PLC. [2002]: An introduction to Functional Safety and IEC 61508. Application Note.

- NOLL, MARTIN; RAPPS, PETER [2015]: Ultraschallsensorik. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- OBJECT MANAGEMENT GROUP [2011]: *OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Superstructure. Version 2.4.1.*
- OMASREITER, HANNES; METZKER, EDUARD [2004]: A Context-Driven Use Case Creation Process for Specifying Automotive Driver Assistance Systems. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE'04)*.
- OTTE, D.; KRETTEK, C.; BRUNNER, H.; ZWIPP, H. [2003]: Scientific Approach and Methodology of a New In-Depth-Investigation Study in Germany so called GIDAS. In: *Proceedings of the 2003 ESV-Conference, Nagoya/Japan*,
- PANDEY, ANISH; KASHYAP, ABHISHEK KUMAR; PARHI, DAYAL R.; PATLE, B. K. [2019]: Autonomous mobile robot navigation between static and dynamic obstacles using multiple ANFIS architecture. *World Journal of Engineering*, 16(2), 275-286. DOI: 10.1108/WJE-03-2018-0092.
- PELLKOFER, MARTIN [2003]: *Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung*. Neubiberg: Dissertation an der Universität der Bundeswehr München.
- PFEIFER ET AL. [1993]: *Etymologisches Wörterbuch des Deutschen*: Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Online verfügbar unter <https://www.dwds.de/wb/wb-etymwb>, zuletzt geprüft am 28.03.2020.
- PFEIFFER, B.-M.; JÄKEL, J.; KROLL, ANDREAS; KUHN, C.; KUNTZE, HELGE-BJÖRN; LEHMANN, U. ET AL. [2002a]: Erfolgreiche Anwendungen von Fuzzy Logik und Fuzzy Control (Teil 1) (Successful Applications of Fuzzy Logic and Fuzzy Control (Part 1)). In: *at - Automatisierungstechnik* 50 (10/2002). DOI: 10.1524/auto.2002.50.10.461.
- PFEIFFER, B.-M.; JÄKEL, J.; KROLL, ANDREAS; KUHN, C.; KUNTZE, HELGE-BJÖRN; LEHMANN, U. ET AL. [2002b]: Erfolgreiche Anwendungen von Fuzzy Logik und Fuzzy Control (Teil 2) (Successful Applications of Fuzzy Logic and Fuzzy Control (Part 2)). In: *at - Automatisierungstechnik* 50 (11/2002). DOI: 10.1524/auto.2002.50.11.511.
- POLIZEIPRÄSIDIUM MÜNCHEN [2017]: *Unfalldaten München (persönliche Korrespondenz)*.
- PUNKE, MARTIN; MENZEL, STEFAN; WERTHESEN, BORIS; STACHE, NICOLAJ; HÖPFL, MAXIMILIAN [2015]: Kamera-Hardware. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- RAPP TRANS AG [2017]: *Chancen und Risiken des Einsatzes von Abstandshaltesystemen sowie des Platoonings von Strassenfahrzeugen - Machbarkeitsanalyse*.
- RASMUSSEN, JENS [1983]: Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. SMC-13* (3), S. 257–266. DOI: 10.1109/TSMC.1983.6313160.

- RATHGEBER, CHRISTIAN [2016]: Trajektorienplanung und -folgeregelung für assistiertes bis hochautomatisiertes Fahren. Dissertation.
- REICHART, GÜNTER [2001]: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme, 7).
- RIEKERT, P.; SCHUNCK, T. E. [1940]: Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs. In: *Ing. Arch* 11 (3), S. 210–224. DOI: 10.1007/BF02086921.
- RIZALDI, ALBERT; ALTHOFF, MATTHIAS [2015]: Formalising Traffic Rules for Accountability of Autonomous Vehicles. In: *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, S. 1658–1665. DOI: 10.1109/ITSC.2015.269.
- ISO 26262: 2011, 2011: Road vehicles — Functional safety.
- ROBERT BOSCH GMBH [2004]: Sicherheits- und Komfortsysteme. 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Bosch Fachinformation Automobil). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-80324-5>.
- ROMMELFANGER, HEINRICH [2013]: Fuzzy Decision Support-Systeme: Entscheiden bei Unschärfe: Springer-Verlag.
- SAE INTERNATIONAL [2018]: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, 06-2018 (J3016).
- SAUERLAND, ULI [2010]: Vagueness in Language: The Case Against Fuzzy Logic Revisited.
- SAYERS, T. M. [1995]: Improving the traffic responsiveness of signal controllers using fuzzy logic. In: IEE Colloquium on Urban Congestion Management. IEE Colloquium on Urban Congestion Management. London, UK, 16 Nov. 1995: IEE, S. 6.
- SCHNIEDER, LARS; HOSSE, RENÉ S. [2019]: Leitfaden Safety of the Intended Functionality. Verfeinerung der Sicherheit der Sollfunktion auf dem Weg zum autonomen Fahren. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- SCHRÖDER, JOACHIM [2009]: Adaptive Verhaltensentscheidung und Bahnplanung für kognitive Automobile. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009.
- SCHUBERT, ROBIN [2014]: Automatische Manöverentscheidungen auf Basis unsicherer Sensordaten. In: W. Siebenpfeiffer (Hrsg.), *Vernetztes Automobil*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- SEIDL, MATTHIAS; HAFEZI, KIA; MORLEY, SIMON; MOHAN, SAKET; CARROLL, JOLYON; CUERDEN, RICHARD ET AL. [2018]: MOVE_UK Deliverable D7.3: Data Analysis Report Phase 1.
- SIPPL, CHRISTOPH; WESSNER, JOSEPH; GERMAN, REINHARD [2016]: Identifying relevant traffic situations from simulation data for testing ADAS and fully automated vehicles - A multilayer model concept. In: *DSC 2016 Europe 2016*, 2016.

- STATISTISCHES BUNDESAMT [2018]: Verkehrsunfälle. Fachserie 8 Reihe 7 - 2017.
- STELLET, JAN ERIK; ZOFKA, MARC RENE; SCHUMACHER, JAN; SCHAMM, THOMAS; NIEWELS, FRANK; ZOLLNER, J. MARIUS [2015]: Testing of Advanced Driver Assistance Towards Automated Driving. A Survey and Taxonomy on Existing Approaches and Open Questions. In: *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, S. 1455–1462.
- TAKAGI, TOMOHIRO; SUGENO, MICHIO [1985]: Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* SMC-15 (1), S. 116–132. DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
- TEODOROVIĆ, DUŠAN [1999]: Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 33 (5), S. 337–364. DOI: 10.1016/S0965-8564(98)00024-X.
- TESLA [2019]: Fahren in der Zukunft. Online verfügbar unter https://www.tesla.com/de_DE/autopilot?redirect=no, zuletzt geprüft am 14.03.2019.
- TÜV DEKRA ARGE TP 21 GBR [2020]: Amtlicher Fragenkatalog für die Führerscheinprüfung. Online verfügbar unter <https://www.fahrschule.de/Fragenkatalog/>.
- ULBRICH, SIMON; MAURER, MARKUS [2013]: Probabilistic online POMDP decision making for lane changes in fully automated driving. In: *Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, S. 2063–2067. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728533.
- ULBRICH, SIMON; MENZEL, TILL; RESCHKA, ANDREAS; SCHULDT, FABIAN; MAURER, MARKUS [2015]: Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for Automated Driving. In: *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, S. 982–988.
- URMSON, C.; ANHALT, J.; BAGNELL, D.; BAKER, C.; BITTNER, R.; CLARK, M. ET AL. [2008]: Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge. In: *Journal of Field Robotics* (28(8)), S. 425–466.
- VACEK, STEFAN [2009]: Videogestützte Umfelderkennung zur Interpretation von Verkehrssituationen für kognitive Automobile. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- VDA [2018a]: Automatisiertes Fahren. Die Evolution von Fahrfunktionen - von Assistenten zu Automaten. Online verfügbar unter <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/zukunft-des-automatisierten-fahrens.html>.
- VDA [2018b]: Fahrzeugsicherheit: neue Euro-NCAP-Anforderungen. Online verfügbar unter <https://www.vda.de/de/themen/sicherheit-und-standards/Fahrzeugsicherheit--neue-Euro-NCAP-Anforderungen/Fahrzeugsicherheit--neue-Euro-NCAP-Anforderungen.html>, zuletzt geprüft am 08.03.2019.

- VOGELPOHL, TOBIAS; KÜHN, MATTHIAS; HUMMEL, THOMAS; GEHLERT, TINA; VOLLRATH, MARK [2018]: Transitioning to manual driving requires additional time after automation deactivation. In: *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* (55), S. 464–482.
- VOLLRATH, MARK; BRIEST, SUSANNE; SCHIEßL, CAROLINE; DREWES, JÖRN; BECKER, UWE [2006]: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit: Bundesanstalt für Straßenwesen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen).
- VOLLRATH, MARK; KREMS, JOSEF F.; HASSELHORN, MARCUS; HEUER, HERBERT; RÖSLER, FRANK [2011]: Verkehrspsychologie. Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker. 1. Aufl. s.l.: Kohlhammer Verlag. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1930415>.
- WACHENFELD, WALTER; WINNER, HERMANN; GERDES, CHRIS; LENZ, BARBARA; MAURER, MARKUS; BEIKER, SVEN ET AL. [2015]: Use-Cases des autonomen Fahrens. in: *Autonomes Fahren*: Springer-Verlag.
- WACHENFELD, WALTHER; JUNIETZ, PHILIPP; WINNER, HERMANN [2016]: Safety Assurance Based on an Objective Identification of Scenarios. One Approach of the PEGASUS-Project. TRB Vehicle Automation Workshop 2016, 2016.
- WAGNER, PETER [2015]: Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen. in: M. Maurer et al. (Hrsg.), *Autonomes Fahren*: Springer.
- WAYMO [2018]: Waymo Safety Report On the Road to Fully Self-Driving.
- WEGENER, MARCO; HÜBNER, MATTHIAS; BRAHMI, MOHAMED; SIEDERSBERGER, KARL-HEINZ [2014]: Anforderungen an ein Referenzsystem für die Fahrzeugortung. In: W. Siebenpfeiffer (Hrsg.), *Vernetztes Automobil*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- WELLER, GERT; SCHLAG, BERNHARD [2002]: Kriterien zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen. In: *Berufsverband Deutscher Psychologinnen und Psychologen (BDP); Sektion Verkehrspsychologie: 38. BDP-Kongress für Verkehrspsychologie, Universität Regensburg*.
- WERLING, MORITZ [2011]: Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien. Dissertation. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik / Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, Band 34).
- WINNER, HERMANN [2015]: Radarsensorik. In: H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- ZADEH, LOTFI A. [1965]: Fuzzy sets. In: *Information and Control* 8 (3), S. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

ZADEH, LOTFI A. [1973]: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/Outline-of-a-New-Approach-to-the-Analysis-of-and-Zadeh/86b1bafeb5371a7b4e6d8b16938e39c8eeb1a970>.

ZLOCKI, ADRIAN [2017]: Securing Automated Driving - The Database Approach in PEGASUS. Brussels: presented at the Conference Connected and Automated Driving.

Abkürzungsverzeichnis

ASIL	Automotive Safety Integrity Level
ACC	Adaptive Cruise Control (Adaptive Geschwindigkeitsregelung)
C2C	Car to Car (Fahrzeug zu Fahrzeug)
C2I	Car to Infrastructure (Fahrzeug zu Infrastruktur)
DSS	Decision Support System (Entscheidungsunterstützungs-System)
dGPS	differential Global Positioning System (differentiales Globales Positionierungssystem)
ECE	Economic Commission for Europe
FAS	Fahrerassistenzsystem
FeV	Fahrerlaubnisverordnung
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
GPS	Global Positioning System (Globales Positionierungssystem)
GUI	Graphical User Interface (grafische Benutzeroberfläche)
HAF	hochautomatisiertes Fahren
ISO	International Organization for Standardization
LIDAR	Light Detection and Ranging
ODD	Operational Design Domain (Betriebsbedingungen eines automatisierten Systems)
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
RADAR	Radio Detection and Ranging
SAE	Society of Automotive Engineers
SOTIF	Safety of the Intended Functionality (Sollfunktionssicherheit)
SQL	Structured Query Language (Strukturierte Abfrage-Sprache für Datenbanken)
StVG	Straßenverkehrsgesetz
StVO	Straßenverkehrsordnung
TÜV	Technischer Überwachungsverein
VAF	vollautomatisiertes Fahren

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Übersicht über das methodische Vorgehen der Arbeit	5
Abbildung 2.1: Unterscheidung der Begriffe der Situationsbeschreibung aus [DOMSCH UND NEGELE 2008]	10
Abbildung 2.2: Klassifikation für Verkehrssituationen ohne Autobahnfahrten aus [FASTENMEIER 1995]	12
Abbildung 2.3: Verknüpfung der 3-Ebenen Modelle von DONGES [1982] und RASMUSSEN [1983] zur Beschreibung der Aufgaben von Kraftfahrzeugfahrern aus [DONGES 2015]	15
Abbildung 2.4: Zusammenhang zwischen Sicherheit und Risiko und Einordnung der Begriffe der Verkehrssicherheit aus [HOFFMANN 2014].....	24
Abbildung 2.5: Systemarchitektur einer automatisierten Fahrfunktion nach [KRAUSE 2015]	26
Abbildung 2.6: Schematische Abbildung und Funktion der Sensoren und deren Abdeckung für Fahrerassistenzsysteme aus [VDA 2018a].....	30
Abbildung 2.7: Beispielhafte Darstellung der Klassen der Umfeldmodellierung aus [HEIGELE ET AL. 2015]	31
Abbildung 2.8: Beispielhaftes Entscheidungsnetz auf der Fahrstrategieebene nach [SCHUBERT 2014]	33
Abbildung 2.9: Konzepte der Bahnplanung aus [EFFERTZ 2009]	35
Abbildung 2.10: Trajektorienschar für einen geplanten Pfad mit optimaler Trajektorie (grün), von gelb nach rot ansteigende Kosten, in grau werden die farbigen Trajektorien weiter in die Zukunft geplant aus [WERLING 2011]	35
Abbildung 3.1: Bestandteile der Situationsbeschreibung innerhalb der Datenbank	44
Abbildung 3.2: Mögliche Positionen von Objekten (grau) in Relation zum Ego-Fahrzeug (weiß)	47
Abbildung 3.3: Manöverrelationen von zwei rechts abbiegenden Verkehrsteilnehmern	47
Abbildung 3.4: Beispielhafte Darstellung eines Knotenpunktes mit Informationen aus der Datenbank	48
Abbildung 3.5: Beispiel einer Frage zum Thema Vorfahrt, Vorrang aus dem amtlichen Fragenkatalog zur theoretischen Führerscheinprüfung [TÜV DEKRA ARGE TP 21 GbR 2020]	50
Abbildung 3.6: Abbildung der Frage 1.3.01-007-M als Bild aus der grafischen Benutzeroberfläche im Beschreibungsformat der Fahrsituationsdatenbank	51
Abbildung 3.7: Ausschnitt aus dem Unfalltypenkatalog des GDV des Typs Abbiege-Unfall [GDV UNFALLFORSCHUNG DER VERSICHERER 2016].....	54
Abbildung 3.8: Struktur der Situationsdatenbank (eigene Darstellung)	56
Abbildung 3.9: Grafische Oberfläche zum Erstellen, Filtern und Analysieren von Fahrsituationen der Datenbank (eigene Darstellung)	57
Abbildung 4.1: Kartendarstellung der Testrouten München Nord (links) und Garching (rechts)	60
Abbildung 4.2: Unfalltypen und -arten der Verkehrsunfälle mit Personenschaden auf den Straßen der Untersuchungsroute.....	62
Abbildung 4.3: Zuordnung einer Unfallbeschreibung zu einem Unfalltypen des GDV Unfalltypenkatalogs.....	63
Abbildung 4.4: schematische Darstellung des Vorgehens beim Data Matching nach [CHRISTEN 2012]	66
Abbildung 4.5: Vorgehensweise des der Klassifikation mittels Data Matching in der Anwendung der Zuordnung von Fahrsituationen zu Verkehrsregeln aus den erweiterten Testfragen des Fragebogenkatalogs zur theoretischen Führerscheinprüfung.....	68

Abbildung 4.6: Videobild einer Fahrsituation im Testgebiet Garching (links) und Übersetzung der Situation in das abstrahierte Beschreibungsformat (mittig) mit einer zugehörigen Verkehrsregel aus den Fragenkatalog (rechts).....	70
Abbildung 4.7: Ergebnisse der Zuordnungen des Data Matching Verfahrens für Fahrsituationen und Unfalltypen der Testfälle und Gegenüberstellung mit den Unfalltypen der Unfälle des Testgebietes	73
Abbildung 5.1: Aufbau eines Fuzzy-Systems	78
Abbildung 5.2: Beispielhafte Zugehörigkeitsfunktionen für Geschwindigkeiten zu den Fuzzy Sets niedrige, mittlere und hohe Geschwindigkeit	80
Abbildung 5.3: logische Operatoren im Vergleich zwischen der klassischen zweiwertigen Logik und der mehrwertigen Fuzzylogik aus [MATHWORKS INC. 2020]	81
Abbildung 5.4: Beispiel eines Fuzzy Inferenzsystems mit drei Regeln, angepasst nach [MATHWORKS INC. 2020]	84
Abbildung 5.5: Prinzip-Schemata zu verschiedenen Anwendungen von Fuzzy Systemen aus [PFEIFFER ET AL. 2002a], [PFEIFFER ET AL. 2002b]	85
Abbildung 5.6: Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy Mengen der Voraussetzungen	90
Abbildung 5.7: Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgabewerte des Fuzzy Systems aus den verwendeten Begriffen der Verkehrsregeln	92
Abbildung 5.8: Beispielsituation aus der Situationsdatenbank, für die ein adäquates Fahrverhalten identifiziert werden soll (links Bild mit Objekten und Manövern, rechts mit beispielhaften Messwerten)	93
Abbildung 5.9: Pseudo-Code für das Vorgehen beim Erstellen der Fuzzy Regelbasis	95
Abbildung 5.10: Output Funktion des Fuzzy Inferenzsystem für die Beispielsituation für den Output Geschwindigkeitsänderung unter Verwendung verschiedener Aggregierungen (oben: max und probor, unten: sum) und jeweils verschiedenen Methoden zur Defuzzifizierung	97
Abbildung 5.11: Ergebnisse der Fuzzy Inferenz für die beiden Beispielsituationen in den verschiedenen Ausgabedimensionen	99
Abbildung 5.12: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Erstellung und Auswertung eines Fuzzy System für die Entscheidungsfindung des korrekten Fahrverhaltens	102
Abbildung 6.1: Zwei Beispielsituationen, die mittels der Kritikalitätsmetrik miteinander verglichen werden sollen	108
Abbildung 6.2: Netzdiagramm zur Bewertung der Kritikalität der beiden Beispielsituationen und deren Vergleich	109
Abbildung 7.1: Unfalltypen die mittels Data Matching für die Beispielsituation identifiziert wurden..	135
Abbildung 7.2: Fuzzy Inferenzsystem zum Beispiel, Abbildung erstellt durch MATLAB.....	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Definition der Stufen der Automatisierung von Fahrzeugen nach unterschiedlichen Institutionen nach [DORNIER CONSULTING INTERNATIONAL 2017].....	27
Tabelle 3.1: Attribute und mögliche Ausprägungen zur Beschreibung der Manöverrelationen	45
Tabelle 5.1: Datenbankeinträge der unscharfen Mengen zur Beispielsituation	88
Tabelle 5.2: Übersicht der Outputs des Fuzzy Inferenzsystems	100

Anhang 1: Überblick Datenbank Fahrsituationen

Haupttabelle Fahrsituationen

- ID
- Name
- Infrastruktur
- Positionsdaten
- Objekte
- Zusatzinfo
- Video
- Testgebiet
- Verkehr

Haupttabelle Verkehrsregeln

- ID
- Name
- Beschreibung
- Fragen aus Fragebogenkatalog
- Relevanzmerkmale
- Infrastruktur
- Objekte
- Verkehr

Haupttabelle Unfalltypen

- ID
- Typ
- Kategorie
- Unfall
- Bilddatei (für GUI)
- Manöverrelation (objektbezogen)
- Infrastruktur-Typ
- Zusatzinfo
- Relevanz global
- Relevanz objektbezogen

Hilfstabelle Infrastruktur

- ID
- Beschreibung (in vordefiniertem Format mit vordefinierten Trennzeichen und Richtungsangaben)
- Typ

Hilfstabelle Objekte

- ID Fahrsituation (nur, wenn zu Fahrsituation gehörend)
- ID Verkehrsregel (nur, wenn zu Verkehrsregel gehörend)
- Bezeichnung
- Position, Winkel

- Status (relevant oder nicht)
- Manöver
- Manöverrelation (ID in der Hilfstabelle)
- Wunschmanöver (nur Ego)
- Geschwindigkeit
- Geschwindigkeitsänderung
- Signal
- Relevante Attribute

Hilfstabelle Manöverrelationen

- ID
- Bilddatei (für GUI)
- Ego Manöver
- Objekt Manöver
- Objekt Position (links oder rechts)
- Objekt Position (vorn oder hinten)
- Objekt Orientierung (parallel oder orthogonal)
- Objekt Ausrichtung (gleich, entgegengesetzt, links oder rechts)

Hilfstabelle Items

- Name
- Bilddatei (für GUI)
- Bezeichnung (wie in Objekte oder Haupttabellen)
- Gruppe (z.B. Verkehrsschild oder bewegliches Objekt)
- Kategorie (z.B. Vorschriftszeichen oder verletzlicher Verkehrsteilnehmer)

Hilfstabelle Fuzzy Sets

- ID Haupttabelle Verkehrsregeln
- Referenzobjekt (ID Objekttable)
- Referenzattribut
- Logischer Operator (NOT oder leer)
- Fuzzy Set
- Kategorie (Aufgabe oder Voraussetzung)

Anhang 2: Beispielimplementierung Data Matching

Das Data Matching wurde für die in Abbildung 4.6 dargestellte Situation angewendet. Die folgenden Fragen der aus dem Fragebogenkatalog der theoretischen Führerscheinprüfung wurden extrahiert:

- 2.1.03-028
- 1.2.05-103
- 1.4.42-145
- 1.2.10-101
- 1.2.10.109
- 1.1.07-022
- 2.1.05-104-M
- 2.2.05-014-M
- 2.1.06-006-B
- 2.1.06-008-M
- 1.2.02.107
- 1.2.06-002-B
- 1.2.06-005
- 2.1.06-008-M

Die Fragen und zugehörigen Abbildungen werden unter anderem von der ADAC Führerschein-App [<http://adac.theorie24.de/2019-10/>] oder auch Fahrschule.de [<https://www.fahrschule.de/Fragenkatalog/>] bereitgestellt.

Konflikte, die zu der Situation extrahiert wurden beinhalten, abgesehen von den Alleinunfällen, die in der folgenden Abbildung dargestellten Unfalltypen des Unfalltypenkatalogs des GDV.

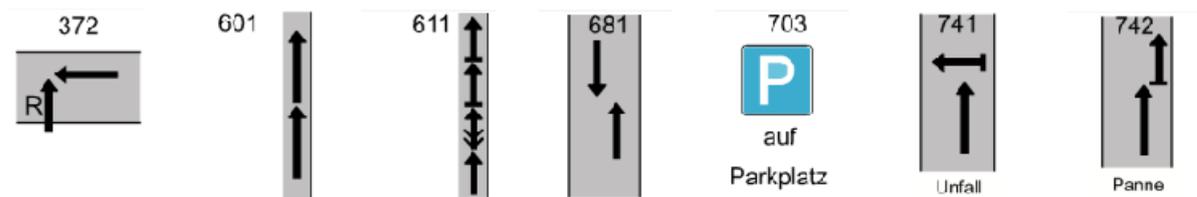


Abbildung 7.1: Unfalltypen die mittels Data Matching für die Beispielsituation identifiziert wurden

Anhang 3: Beispielimplementierung Fuzzy System

Als Eingangsgrößen werden die in Abbildung 5.9 dargestellten Werte verwendet. Diese werden nach den Formeln aus 5.2.2 unter der Annahme, dass das Ego-Fahrzeug 30km/h fährt umgerechnet zu: [0.8000, 1.0000, 0.5000, 0, 1.7143, 0.8571, 0, 0.0333, -1.0000, -0.9667, 0] und gehen so als Eingangsgrößen in das Fuzzy Inferenzsystem ein.

- $v_{Ego} = 30$;
- $v_{lim} = 30$;
- $Abstand_{laengs_2} = 12$;
- $Abstand_{laengs_4} = 15$;
- $Abstand_{laengs_5} = 30$;
- $Abstand_{quer_2} = 0$;
- $Abstand_{quer_4} = 3$;
- $Abstand_{quer_5} = 1.5$;
- $Geschwindigkeit_2 = 0$;
- $Geschwindigkeit_4 = 1$;
- $relativGeschwindigkeit_2 = -30$;
- $relativGeschwindigkeit_4 = -29$;
- $relativGeschwindigkeit_5 = 0$;

Die Abbildung 7.2 stellt das für das Beispiel erzeugte Fuzzy Inferenzsystem dar. Es wurden neun Eingangsgrößen verwendet, zwölf Regeln aufgestellt und fünf Ausgabegrößen erzeugt.

Die Eingangsgrößen sind im Kapitel 5.2.1 gezeigt und werden jeweils für die Referenzobjekte kopiert. Die nicht benötigten Dummy Fuzzyfunktionen (die ersten 6 in der Abbildung) verbleiben im System, werden aber nicht benötigt. Die Zahl in Klammern gibt die Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen in einer Fuzzyfunktion an.

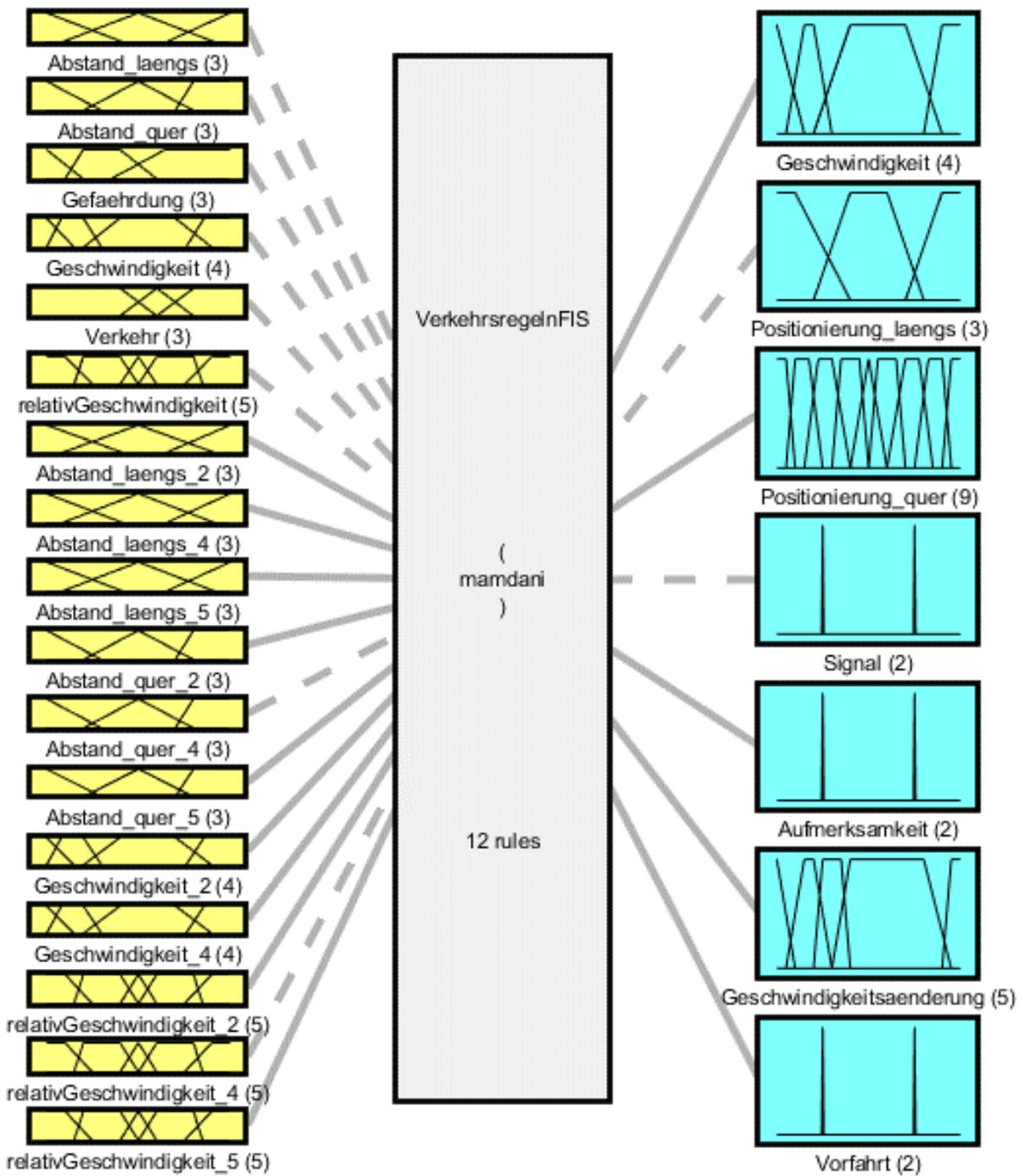


Abbildung 7.2: Fuzzy Inferenzsystem zum Beispiel, Abbildung erstellt durch MATLAB

Im Inferenzsystem werden für das in Kapitel 5.2 ausgewertete Beispiel die im Folgenden aufgeführten Regeln verwendet, wobei die folgenden Bezeichnungen verwendet werden:

<u>Bezeichnung</u>	<u>Bedeutung</u>
&	UND
==	IST
~=	IST NICHT
=>	DANN

```
{relativGeschwindigkeit_2==langsamer & relativGeschwindigkeit_2~=wesentlich_langsamer
& Abstand_laengs_2~=fern & Abstand_laengs_2~=ausreichend_Sicherheitsabstand => Ge-
schwindigkeitsaenderung=reduzieren'}
```

```
{Abstand_laengs_4==sehr_nah & Abstand_quer_4==sehr_nah => Geschwindigkeitsaende-
rung=stark_abbremsen'}
```

```
{Abstand_quer_5==sehr_nah => Positionierung_quer=moeglichst_weit_rechts'}
```

```
{Abstand_laengs_2~=fern & Abstand_quer_5~=fern & Geschwindigkeit_2==stehen & Ab-
stand_laengs_5~=fern => Geschwindigkeit=stehen, Positionierung_quer~=ueberholen_links'}
```

```
{relativGeschwindigkeit_5==wesentlich_langsamer => Positionierung_quer=ueberho-
len_links'}
```

```
{Geschwindigkeit_2==stehen => Positionierung_quer=ueberholen_links'}
```

```
{Geschwindigkeit_2==stehen => Geschwindigkeit=vorsichtig'}
```

```
{Abstand_laengs_5==nah & Abstand_quer_5==nah => Geschwindigkeit=stehen'}
```

```
{Abstand_laengs_2==nah & Abstand_quer_2==nah => Geschwindigkeit=stehen'}
```

```
{Geschwindigkeit_4~=stehen => Geschwindigkeitsaenderung=abbremsen, Aufmerksam-
keit=erhoeht'}
```

```
{Abstand_laengs_5==sehr_nah => Positionierung_quer=moeglichst_weit_rechts, Geschwin-
digkeitsaenderung=reduzieren'}
```

```
{relativGeschwindigkeit_2==langsamer & Abstand_laengs_5~=fern & Abstand_quer_5~=fern
=> Geschwindigkeitsaenderung=reduzieren, Positionierung_quer~=ueberholen_links'}
```