

Semantische Normverhaltensanalyse zur durchgängigen, formalen Verhaltensspezifikation automatisierter Straßenfahrzeuge

Nayel Fabian Salem^{*†}, Veronica Haber[‡], Marcus Nolte[†],
Robert Graubohm[†], Matthias Rauschenbach[§], Jan Reich[¶],
Torben Stolte[†] und Markus Maurer[†]

Zusammenfassung: Die Absicherung automatisierter Straßenfahrzeuge (SAE Level 3+) setzt die Spezifikation und Überprüfung des Verhaltens eines Fahrzeugs in seiner Betriebsumgebung voraus. Mithilfe von Szenarien kann der offene Verkehrskontext, in dem ein solches System agiert, strukturiert beschrieben werden. Um Annahmen, welche bei der Verhaltensspezifikation innerhalb von Szenarien getroffen werden, begründen und belegen zu können, ist eine durchgängige Dokumentation von Entwurfsentscheidungen erforderlich. In dieser Arbeit wird die *semantische Normverhaltensanalyse* vorgestellt, mithilfe derer Ansprüche an das Verhalten eines automatisierten Fahrzeugs in seiner Betriebsumgebung durchgängig auf ein formales Regelsystem aus semantischen Konzepten für ausgewählte Szenarien abgebildet werden können. Der Beitrag der vorgestellten Methode besteht in der Rückverfolgbarkeit dieser formalisierten Konzepte zu den damit verbundenen Ansprüchen an das Verhalten. Die Durchführung einer semantischen Normverhaltensanalyse wird beispielhaft an zwei Szenarien demonstriert.

Schlüsselwörter: Durchgängigkeit, Verhaltensspezifikation, Wissensrepräsentation

1 Einleitung

Die fortschreitende Automatisierung der Fahraufgabe stellt Beteiligte aus Gesetzgebung, Technik und Ethik gleichermaßen vor neue Herausforderungen. Um die mit dem automatisierten Fahren (SAE Level 3+ [1]) Versprechungen – z.B. die Erhöhung der Verkehrssicherheit – zu erfüllen, müssen Anforderungen an sicheres und regelkonformes Verhalten automatisierter Straßenfahrzeuge im Straßenverkehr formuliert und geprüft werden.

Für Entwickler*innen automatisierter Straßenfahrzeuge ergibt sich daraus unter anderem die Aufgabe, zu begründen und zu kommunizieren, warum sich das Fahrzeug regelkonform und sicher im Straßenverkehr verhalten wird. Um regelkonformes Verhalten argumentieren und belegen zu können, ist es notwendig, Anforderungen an regelkonformes Verhalten zunächst zu formulieren und anschließend zu überprüfen. Für die Entwicklung

*Korrespondierender Autor: salem@ifr.ing.tu-bs.de

†Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

‡PROSTEP AG, München

§Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

¶Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE, Kaiserslautern

automatisierter Straßenfahrzeuge bedeutet dies – insbesondere für eine Konformität mit der ISO 21448 [2] – eine Spezifikation des zu implementierenden Verhaltens in Bezug zu seiner Betriebsumgebung.

Eine besondere Herausforderung bei der Verhaltensspezifikation automatisierter Straßenfahrzeuge ergibt sich aus dem Betrieb dieser Systeme im offenen Verkehrskontext, der bedingt, dass szenarienbasierte Ansätze der Absicherung inhärent mit epistemischen und aleatorischen Unsicherheiten einhergehen [3]. Die im Folgenden vorgestellte *semantische Normverhaltensanalyse* unterstützt den Prozess der expliziten Dokumentation von Annahmen und getroffenen Entwurfsentscheidungen bei der Spezifikation von zu implementierendem Verhalten durch die Formalisierung von Verhaltensregeln und kann dadurch die Nachvollziehbarkeit residualer Unsicherheiten erhöhen. Die Vollständigkeit der resultierenden Verhaltensspezifikation ist in Bezug auf den offenen Kontext weiterhin inhärent nicht gegeben, da die Analyse sich auf einen (idealerweise repräsentativen) Szenarienkatalog bezieht. Formalisierte Ansätze zur Verhaltensbeschreibung ermöglichen jedoch, innerhalb der verwendeten Formalismen, Konsistenz zu belegen.

Diese Arbeit beschreibt zunächst die verwendete Terminologie zur Verhaltensspezifikation (Abschnitt 2) und verwandte Arbeiten (Abschnitt 3). Anschließend erläutern wir die Bestandteile der semantischen Normverhaltensanalyse (Abschnitt 4). Die Anwendung der Methode wird an einem Beispiel illustriert (Abschnitt 5) und evaluiert (Abschnitt 6).

2 Terminologie

Im Folgenden definieren wir das *Normverhalten* als das aus gesetzlichen, gesellschaftlichen und ethischen sowie sicherheitsbezogenen Ansprüchen resultierende Verhalten eines Akteurs in einem *szenarienübergreifenden Kontext*.

Dagegen ist das *Sollverhalten* das sich aus gesetzlichen, gesellschaftlichen und ethischen sowie sicherheitsbezogenen Ansprüchen abgeleitete, umzusetzende Verhalten eines Akteurs in einem *szenarienspezifischen Kontext*.

Der Begriff *Verhalten* folgt hierbei im Gegensatz zu Censi u. a. [4] der Definition im Rahmen der verhaltensbasierten Robotik [5, 6] und beinhaltet dementsprechend neben dem von außen beobachtbaren Verhalten auch die dafür notwendigen Informationsflüsse als Stimuli der Systemantwort des Akteurs.

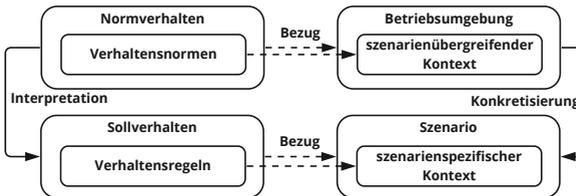


Abbildung 1: Darstellung der Beziehung von Normverhalten und Sollverhalten.

Im Folgenden werden allgemeine Verhaltensnormen in Summe als Normverhalten und konkrete Verhaltensregeln als Sollverhalten bezeichnet (Abbildung 1). Die Berücksichtigung gegebenenfalls konfliktärer Verhaltensnormen in einem szenarienübergreifenden

Kontext beziehungsweise einer Betriebsumgebung [7] (Normverhalten) erfordert bei der Formulierung von Verhaltensregeln in einem gegebenen Szenario [8] (Sollverhalten) sowohl eine szenarienspezifische Interpretation als auch eine Auflösung und damit verbundene Abwägung von Zielkonflikten.

Als Verhaltensnorm könnte beispielsweise formuliert werden, dass durchgezogene Fahrstreifenmarkierungen im Allgemeinen nicht zu überfahren sind. In einem Szenario, in dem der eigene Fahrstreifen belegt und der benachbarte Fahrstreifen frei ist, könnte dagegen die Entwurfsentscheidung getroffen werden, eine Verhaltensregel zu formulieren, welche das Überfahren der durchgezogenen Markierung (z. B. aufgrund eines Notstands nach § 16 OWiG) begründet. Die Legitimität der Begründung wird gegebenenfalls *ex post* durch entsprechende Institutionen wie Gerichte und Ethikräte festzustellen sein. Eine Repräsentation dieser mit der Verhaltensspezifikation verbundenen Annahmen und Abwägungen ist für Entwickler*innen insbesondere notwendig, um eine Argumentationsgrundlage gegenüber firmeninternen und -externen Institutionen zu besitzen, falls nicht regelkonformes Verhalten eines automatisierten Fahrzeugs im Feld beobachtet wird.

Unter Verwendung der vorgestellten Terminologie präsentieren wir folgende Beiträge:

- Analysen von Verhaltensnormen eines szenarienübergreifenden Kontextes und dabei getroffene Annahmen werden explizit dokumentiert.
- Verhaltensnormen werden über eine szenarienbasierte Betrachtung durchgängig als formale Verhaltensregeln abgebildet.
- Der spezifizierte Regelkatalog kann hinsichtlich seiner Konsistenz durch die Anwendung formaler Logik überprüft werden.
- Die durchgängige Spezifikation von Verhalten ermöglicht eine Überprüfung der Konformität dokumentierter Verhaltensregeln mit analysierten Verhaltensnormen innerhalb betrachteter Szenarien.

3 Verwandte Arbeiten

Bezogen auf normative Randbedingungen ist die semantische Normverhaltensanalyse wie folgt einzuordnen: In der ISO 21448 wird die Erstellung einer *funktionalen Spezifikation* (engl. *functional specification*) gefordert, welche unter anderem die *Fahrregeln* (engl. *driving policy*) beinhaltet. Die semantische Normverhaltensanalyse ermöglicht eine explizite Dokumentation von Entwurfsentscheidungen bei der Entwicklung solcher Fahrregeln (bzw. des Sollverhaltens). Auch Analysen der funktionalen Sicherheit nach ISO 26262 wie eine Gefährdungsidentifikation können durch eine Spezifikation des Sollverhaltens unterstützt werden [9].

Zur Repräsentation spezifizierter Verhaltensregeln verwenden wir Ontologien und Regeln der Prädikatenlogik erster Ordnung [10]. Die Nutzung (semi-)formaler Sprachen erfüllt den Zweck der automatisierten Überprüfung der Verhaltensspezifikation hinsichtlich ihrer Konsistenz wie nach [11] und [12] gefordert. Diese automatisierbare Überprüfung ist eine Erweiterung gegenüber [13], wo mit einer strukturierten natürlichen Sprache bereits eine erste Formalisierung ohne einen Formalismus zur automatisierten Überprüfung erzeugt wird. Weitere Ansätze zur Formalisierung des Sollverhaltens [14–16] beschränken sich in der Verhaltensspezifikation auf die statische Umgebung.

In der wissensbasierten Szenariengenerierung [17, 18] ist die Auswahl relevanter Szenarien für die Absicherung automatisierter Fahrsysteme eine offene Herausforderung. Die semantische Normverhaltensanalyse kann zu dieser Auswahl beitragen, da sie die systematische Herleitung von Szenarien, in denen sich das Ego-Fahrzeug konform zur Verhaltensspezifikation verhält, unterstützt.

Im Fokus der hier vorgestellten Arbeit steht die Verhaltensspezifikation auf Ebene funktionaler Szenarien. Um Sollverhalten innerhalb von Szenarien dieser Abstraktionsebene beschreiben und analysieren zu können, wurde das Phänomen-Signal-Modell vorgestellt [19, 20]. Der Ansatz greift auf einen Satz formaler Regeln zurück, um Handlungsoptionen im Rahmen des Sollverhaltens zu schlussfolgern. Die semantischen Normverhaltensanalyse kann den Prozess zur Spezifikation dieser Verhaltensregeln unterstützen.

Dieser Anspruch unterscheidet sich von anderen Arbeiten, welche Ansätze zur Formalisierung, unter anderem von Verkehrsregeln, vorschlagen [21–25]. Die Motivation dieser Ansätze besteht in der direkten Übersetzung von Verkehrsregeln in formale Beschreibungssprachen. Dabei wird der Aspekt der Durchgängigkeit von Konzepten und Regeln in Bezug auf getroffene Entwurfsentscheidungen vernachlässigt. Im Fall von [21] und darauf aufbauenden Arbeiten [22–24] bleibt unklar, wie sich der Ansatz im Kontext einer szenarienbasierten Absicherung anwenden lässt. Der Ansatz nach [25] ordnet sich mit einem Fokus auf die Harmonisierbarkeit von Prozessen zur Formalisierung von Verkehrsregeln dem szenarienbasierten Ansatz zu, eine konkrete Umsetzung bleibt aber offen.

Insbesondere in der Luftfahrt [26] und der Robotik [27], aber auch im Rahmen des automatisierten Fahrens [4, 28], werden auch formale Modelle und Methoden zur Dokumentation des angestrebten Verhaltens automatisierter Systeme verwendet. Diese Ansätze unterscheiden sich insbesondere in ihrem expliziten Bezug (bzw. ihrer Durchgängigkeit) zu den zugrundeliegenden Quellen von Annahmen und Verhaltensanforderungen. Das automatisierte Fahren im offenen Verkehrskontext stellt mit der Moderation insbesondere gesellschaftlicher und rechtlicher Aspekte [4] aber auch im Umgang mit Unsicherheiten [3] Anforderungen an die Durchgängigkeit einer Verhaltensspezifikation, welche durch die untersuchte Literatur nur teilweise adressiert werden.

4 Ansatz zur semantischen Normverhaltensanalyse

Abbildung 2 stellt das Vorgehen der semantischen Normverhaltensanalyse dar. Im ersten Schritt werden die genutzten Wissensquellen für die Analyse des Normverhaltens gewählt (z.B. die StVO). Diese Wissensquellen können Informationen zu Konzepten und Regeln sowie Methoden zum Umgang mit den gewählten Wissensquellen beinhalten. Wissensquellen sind im Kontext der Betriebsumgebung auszuwählen und zu analysieren. Die Betriebsumgebung wird hier als Summe von Bedingungen verstanden, unter denen ein automatisiertes Fahrzeug erwartbar und zulässig betrieben wird [1].

Zur Modellierung des Norm- und Sollverhaltens müssen zunächst die Elemente, die für die formale Beschreibung der Verhaltensregeln notwendig sind, aus den Wissensquellen herausgearbeitet werden. Während in den meist natürlich-sprachlich dokumentierten Quellen auch implizites Wissen enthalten ist, kann mit Hilfe expliziter Konzepte erklärbar und rückverfolgbar geschlussfolgert werden. Zum Beispiel verwendet die StVO Konzepte wie *Fahrstreifen*. Dabei ist ein Fahrstreifen immer Bestandteil einer *Fahrbahn*. Das Wissen darüber, dass das Befahren eines Fahrstreifens einer Fahrbahn immer auch das Befahren

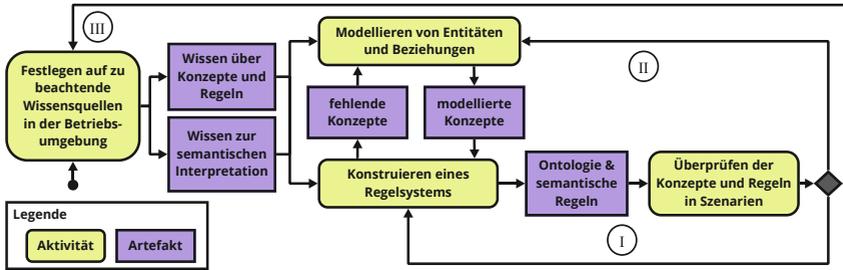


Abbildung 2: Darstellung des Vorgehens bei der semantischen Normverhaltensanalyse. Iterationen I, II und III werden durchlaufen, wenn die Überprüfung des inferierten Sollverhaltens Fehler im Regelsystem, Fehler bei den modellierten Konzepten oder Fehler bei der Auswahl der Wissensquellen feststellt. Fehlerhaftes Verhalten bedeutet: nonkonformes oder unsicheres Verhalten.

der Fahrbahn bedingt, erscheint zunächst trivial, kann aber bei der formalen Beschreibung eine wesentliche Schlussfolgerung sein.

Wissen über Konzepte und Regeln stammt häufig aus Wissensquellen, die Expertenwissen zur semantischen Interpretation voraussetzen. Daher sind zusätzlich Wissensquellen notwendig, die Methoden zum Umgang mit Domänenwissen beschreiben. Diese Methoden werden genutzt, um die Wissensquellen systematisch auf enthaltenes Wissen zu untersuchen und die Konzepte und Regeln zu formalisieren. Methodisches sowie domänenbezogenes Expertenwissen und damit verbundene semantische Interpretationen sind oft notwendig, weil Entitäten, Relationen und Regeln nicht immer explizit dokumentiert sind. Ohne Interpretation impliziter zu expliziten Konzepten wäre eine formale Repräsentation semantischer Beziehungen nicht möglich. Das in Abschnitt 5 gewählte Beispiel erfordert etwa die Repräsentation des Konzepts von „erkennbar querenden zu Fuß Gehenden“. Die StVO als Wissensquelle gibt keinen unmittelbaren Aufschluss darüber, welche Bedingungen an dieses Konzept geknüpft sind. Domänen-Expert*innen könnten hier zum Beispiel Gerichtsurteile heranziehen, um eine Interpretation zu stützen.

Eine Anbindung der Wissensmodellierung an existierendes Domänenwissen durch die flexible Wahl der Wissensquellen sowie der Methoden zur semantischen Interpretation ist ein zentrales Ziel der semantischen Normverhaltensanalyse. Der Ansatz stellt so die Anforderung an Domänen-Expert*innen, die Wissensquellen bezüglich enthaltener Konzepte und Regeln zu trennen. Die formale Strukturierung von Konzepten und Regeln ermöglicht eine formale Überprüfbarkeit der modellierten Verhaltensregeln hinsichtlich ihrer Konsistenz.

Zur formalen Repräsentation des natürlich-sprachlichen Wissens werden in der semantischen Normverhaltensanalyse Ontologien verwendet. Um diese Ontologien zur Verhaltensspezifikation nutzen zu können, werden Entitäten, deren Beziehungen sowie Inferenzregeln aus den zugrundeliegenden Wissensquellen modelliert. Die Konzeptualisierung von Entitäten und Beziehungen (Schritt 2) sowie die Konstruktion von Regeln (Schritt 3) bilden einen iterativen Prozess, da Konzepte in teilweise implizit repräsentiertem Wissen erst bei der Regelkonstruktion identifiziert werden können.

Verifiziert wird der erzeugte Regelkatalog in einem letzten Analyseschritt, in dem die Regeln auf alle betrachteten Szenarien angewendet werden. Dieser Schritt kann zum Beispiel mithilfe eines Phänomen-Signal-Modells [19, 20] durchgeführt werden. Mit der semantischen Normverhaltensanalyse wird zunächst nur eine systematische Ableitung von Verhaltensregeln für Szenen [8] eines funktionalen Szenarios [29, 30] beabsichtigt. Das Sollverhalten setzt sich auf der Beschreibungsebene eines funktionalen Szenarios aus den angewendeten Verhaltensregeln zusammen.

Aus der Verifikation ergeben sich im Rahmen der semantischen Normverhaltensanalyse (Abbildung 2) drei unterschiedliche Arten möglicher Fehlerfälle, die durch drei entsprechende Iterationsschleifen adressiert werden. Fehlerfälle bezeichnen eine Abweichung des aus dem spezifizierten Regelkatalog resultierenden Verhaltens von dem durch die Analyse der Wissensquellen vorgegebenen Verhalten und damit nonkonformes oder unsicheres Verhalten. Die erste Iteration (I) wird durch einen Fehlerfall aufgrund unzureichend definierter Regeln bedingt. Unzureichend bedeutet hier widersprüchlich oder nicht ausreichend detailliert. Ziel dieser Schleife ist die Erzeugung eines konsistenten Regelkatalogs. Der Eintritt in die zweite Iterationsschleife (II) wird durch fehlende Konzepte ausgelöst. Diese Schleife ist nötig, da selbst in einem konsistenten Regelkatalog festgestellt werden kann, dass die Konzeptualisierung für ein Szenario nicht hinreichend vollständig ist. Das Ziel der Schleife ist die Korrektheit des Regelkatalogs in Bezug auf die untersuchten Szenarien. In der dritten Schleife (III) kann eine in Bezug auf die Szenarien und Wissensquellen hinreichend vollständige Ontologie der Konzepte und ein widerspruchsfreier Regelkatalog vorliegen. Falls dennoch in Frage steht, ob das geschlussfolgerte, regelkonforme Verhalten dem tatsächlich gewünschten Sollverhalten entspricht, können die Wissensbasis geprüft und neue Quellen hinzugezogen werden.

Da Szenarien für die Ableitung von Verhaltensnormen genutzt werden, ist die Repräsentativität des Szenarienkatalogs maßgeblich verantwortlich für die Validität des formalisierten Sollverhaltens innerhalb einer Betriebsumgebung.

Die Überprüfung der Übertragbarkeit formalisierter Konzepte und Regeln von den analysierten Szenarien auf den offenen Kontext ist nicht Bestandteil des vorgeschlagenen Ansatzes. Grenzen des Ansatzes können daher in Hinblick auf die Repräsentativität des genutzten Szenarienkatalogs und die Validität der verwendeten Wissensquellen identifiziert werden. In Bezug auf die verwendeten Wissensquellen bezieht sich die Validität auf die Akzeptanz der Auswahl aus der Sicht relevanter Stakeholder in der Betriebsumgebung.

5 Anwendung des Ansatzes an einem Beispiel

Zur Demonstration der semantischen Normverhaltensanalyse werden die zwei ausgewählten Szenarien beispielhaft auf Verhaltensnormen analysiert. Hierbei wird als Beispiel einer Wissensquelle ein Abschnitt der Straßenverkehrsordnung (StVO) [31] verwendet. Anschließend wird das Sollverhalten auf Basis des analysierten Normverhaltens formalisiert¹.

¹Die beispielhaft gezeigte Anwendung rechtswissenschaftlicher Methoden soll die mögliche Schnittstelle zwischen der Analyse von Gesetzestexten und der technischen Implementierung eines Regelwerks in der semantischen Normverhaltensanalyse zeigen. Die Übertragbarkeit der umgesetzten Analyse auf andere Wissensquellen, v.a. auf andere Rechtskontexte, wird in dieser Arbeit explizit nicht angenommen. Da die semantische Interpretation von Konzepten und Regeln den Expert*innen der Rechtsdomäne obliegt, macht der Ansatz lediglich einen methodischen Vorschlag zur Anbindung an eine formale Wissensrepräsentation.

Abbildung 3 zeigt zwei funktionale Szenarien (nach [29, 30]), in denen das automatisierte Fahrzeug von Westen in eine T-Kreuzung einfährt und ein Fußgänger von Süden auf einen Fußgängerüberweg der T-Kreuzung zuläuft. In Abbildung 3a ist der südliche Einlaufbereich des Fußgängerüberwegs vollständig durch das automatisierte Fahrzeug einsehbar. Im Gegensatz dazu behindert ein parkendes Fahrzeug in Abbildung 3b die Einsicht in den Einlaufbereich bis zum Haltepunkt am Fußgängerüberweg.

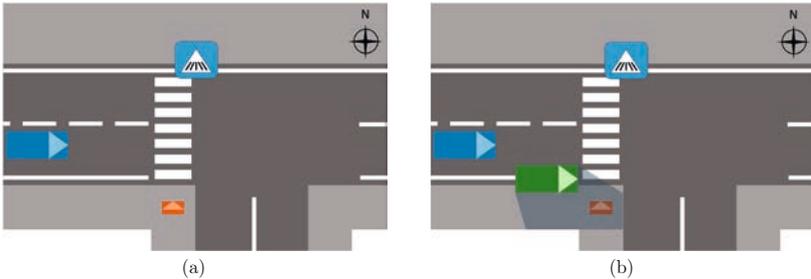


Abbildung 3: Die gewählten funktionalen Szenarien beinhalten das Ego-Fahrzeug (blau), ein parkendes Fahrzeug (grün) und einen auf den Fußgängerüberweg zulaufenden Fußgänger (orange). Der aus Sicht des Ego-Fahrzeugs verdeckte Bereich wurde zur Illustration ergänzt und ist nicht Teil der Szenarbeschreibung.

Der erste Schritt der semantischen Normverhaltensanalyse (Abbildung 2) erfordert eine Definition der zu beachtenden Wissensquellen innerhalb der Betriebsumgebung, für die hier die folgenden Annahmen gelten:

- (A1) Das automatisierte Fahrzeug wird ausschließlich in Deutschland betrieben.
- (A2) Das automatisierte Fahrzeug wird auf öffentlichen Straßen betrieben.
- (A3) Das automatisierte Fahrzeug wird im urbanen Raum betrieben.

5.1 Exemplarische Rechtsanalyse

Als Wissensquelle für die Konzeptualisierung sowie die Formalisierung von Regeln wird beispielhaft ein Abschnitt der deutschen StVO in der Fassung von 2013 [31] verwendet. Weiterhin wird die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO) in der Fassung von 2021 [32] herangezogen.

Um Wissen über Konzepte und Regeln, welches in den gewählten Wissensquellen enthalten ist, interpretieren zu können, werden in diesem Beispiel Methoden zur Erstellung rechtswissenschaftlicher Gutachten [33, 34] genutzt. Das bedeutet, dass hier beispielhaft geleistete Interpretationen der StVO² durch den Gutachtenstil und die verwendete

²Es ist zu beachten, dass Regeln für fahrende Personen in diesem Beispiel auf Regeln für das automatisierte Fahrzeug übertragen werden. Die offene Debatte über die juristische Validität dieses Vorgehens wird in diesem Artikel nicht diskutiert (vgl. hierzu Gstöttner u. a. [35]).

Analysemethode maßgeblich die formalisierten Konzepte und Regeln beeinflussen. Gleichzeitig ermöglicht die explizite Interpretation eine durchgängige Dokumentation getroffener Annahmen bei der Formalisierung.

Im **Obersatz** des Gutachtens wird zunächst eine zentrale Fallfrage formuliert, die „neutral und ohne unwichtige Exkurse“ [34, S. 2] im Laufe des Gutachtens beantwortet werden soll. Nach Hildebrand [34] muss das Gutachten dabei vor allem neutral und ökonomisch sein. Es ist also eine Wertung durch den Autor zu vermeiden und es sind ausschließlich die für die Beantwortung der Fallfrage notwendigen Informationen im Gutachten zu repräsentieren. Ausgehend von dem vorliegenden Szenario könnte der Obersatz für das Anwendungsbeispiel folgendermaßen formuliert werden.

Obersatz. *Welche Pflichten entstehen für die fahrende Person des blauen Fahrzeugs nach §26 StVO in der in Abbildung 3a abgebildeten Szene.*

Diese Formulierung des Obersatzes³ ist aufgrund seines konkreten Bezugs nicht ohne Anpassung auf das zweite Szenario in Abbildung 3b anwendbar. Die Evaluation wird zeigen, dass für jedes zu betrachtende Szenario eine semantische Analyse der Verhaltensnormen notwendig ist, um ein korrektes Sollverhalten abzuleiten.

Im nächsten Schritt des gutachterlichen Vierschritts, der **Definition**, werden alle relevanten Rechtsnormen, die zur Beantwortung der Fallfrage notwendig sind, herangezogen und so weit analysiert, wie es zur Beantwortung der Fallfrage nötig ist. Bei der Definition werden alle relevanten Tatbestände und Tatbestandsmerkmale gesammelt und erklärt. Tatbestände werden als Grundlage einer Rechtsfolge verstanden. Für einen Tatbestand sind Merkmale definiert, die für dessen Gültigkeit heranzuziehen sind. Im betrachteten Anwendungsbeispiel könnte ein Teil der Definition lauten:

Definition. *Nach §26 (1) Satz 1 StVO besteht für die fahrende Person eines Fahrzeugs die Pflicht, „an Fußgängerüberwegen den zu Fuß Gehenden, [...], welche den Fußgängerüberweg erkennbar nutzen wollen, [...], das Überqueren der Fahrbahn zu ermöglichen.“*

Laut der VwV-StVO zu §26 StVO IV. erfolgt die Kennzeichnung eines Fußgängerüberwegs mit der Markierung Zeichen 293. Zusätzlich wird durch Zeichen 350 auf Fußgängerüberwege hingewiesen.

In der Definition wurde herausgearbeitet, dass §26 StVO sich unter anderem auf den Tatbestand des Vorhandenseins eines Fußgängerüberwegs bezieht. Die Tatbestandsmerkmale, anhand derer dieser Tatbestand erkannt werden kann, sind in der VwV-StVO zu §26 StVO definiert. Für einen gültigen Fußgängerüberweg ist demnach die Markierung „Zeichen 293“ (der *Zebrastrreifen*) obligatorisch. Zusätzlich weist das blaue Hinweisschild „Zeichen 350“ fahrende Personen auf das Vorhandensein eines Fußgängerüberwegs hin. Das Beispiel zeigt, dass die Erkenntnisse aus der Definition genutzt werden können, um Konzepte und Schlussregeln für die Wissensmodellierung abzuleiten. Nachdem durch den Obersatz eine durch die Analyse zu beantwortende Fragestellung vorgegeben wurde, kann der Definitionsschritt einen Beitrag zur expliziten Interpretation von Gesetzestexten leisten. In der exemplarischen Anwendung wurde die Definition als eine wesentliche Schnittstelle zwischen Expert*innen der Wissensquellen und der Anwendungsdomäne identifiziert.

³Üblicherweise wird der Obersatz eines Gutachtens als Entscheidungsfrage formuliert. Im Beispiel der semantischen Normverhaltensanalyse liegt der Fokus auf der Konzeptualisierung und Regelkonstruktion, die Fragestellung ist daher offen gehalten.

In der **Subsumtion** des Gutachtens werden das Szenario und das terminologische Gerüst, das in der Definition aufgespannt wurde, miteinander verbunden. Die abstrakten Schlüsselbegriffe der Definition werden auf das vorliegende Szenario angewendet (sylogistische Schlussfolgerung), indem verglichen wird, ob die im Szenario vorliegenden Sachverhalte anhand der definierten Tatbestandsmerkmale dem in der Gesetzesnorm vorliegenden Tatbestand zugeordnet werden können [34, S. 26 ff.]):

Subsumtion. *An der in Abbildung 3a abgebildeten Kreuzung ist eine Straßenmarkierung vorhanden, die sich als Zeichen 293 der StVO einordnen lässt. Zudem enthält das Szenario am Straßenrand neben der Markierung 293 das Schild 350 als Hinweis auf einen Fußgängerüberweg. Somit liegt im Szenario, das in 3a abgebildet ist, laut VwV-StVO zu §26 StVO IV. die Kennzeichnung eines Fußgängerüberwegs vor.*

Der letzte Schritt zur Erstellung eines Gutachtens ist das Ausformulieren eines **Ergebnisses**. Das Ergebnis beantwortet die im Obersatz formulierte Frage. Hier wird auf alle Schlussfolgerungen, die in der Subsumtion getroffen wurden, Bezug genommen und ein Gesamtergebnis formuliert:

Ergebnis. *Die fahrende Person des blauen Fahrzeugs aus der in Abbildung 3a beschriebenen Situation ist nach §26 StVO dazu verpflichtet, dem zu Fuß Gehenden das Überqueren der Fahrbahn zu ermöglichen. Somit darf sie nur mit mäßiger Geschwindigkeit heranfahren und muss, wenn nötig, warten.*

Um ein Ergebnis zu formulieren, welches die Frage des Obersatzes abschließend klärt, sind im gewählten Szenario weitere Analysen durchzuführen. Im Anwendungsbeispiel wurden hierfür Annahmen bei der Definition und Subsumtion getroffen. Eine Annahme (basierend auf Annahme A3) innerhalb des Gutachtens war die Markierung des Fußgängerüberwegs innerhalb einer Ortschaft. Diese Annahme wäre im Rahmen einer umfangreicheren Definition zu untersuchen, da sie explizit für die Gültigkeit eines Fußgängerüberwegs gefordert ist. Weiterhin wurde angenommen, dass die Person im Szenario den Überweg erkennbar nutzen möchte. Auch diese Annahme ist in einem aussagekräftigen Gutachten zu untersuchen. Aus Sicht der semantischen Normverhaltensanalyse ist der Ergebnissatz die Zusammenfassung des Sollverhaltens in Bezug auf das vorliegende Szenario und daher dazu geeignet, als eine Indikation für die Richtigkeit des inferierten Verhaltens zu dienen.

5.2 Formalisierung der Konzepte und Regeln

Für eine Durchgängigkeit an der Schnittstelle zwischen natürlich-sprachlicher und formaler Repräsentation des Sollverhaltens ist die Wahl des Abstraktionsgrads wesentlich. Im folgenden Teil des Anwendungsbeispiels wird Sollverhalten auf der Ebene funktionaler Szenarien [29, 30] beispielhaft in eine formale Repräsentation übersetzt.

Eine Entscheidung bei der beispielhaften Umsetzung der semantischen Normverhaltensanalyse wird bei der Wahl der genutzten formalen Repräsentationssprache getroffen. Die Wahl der Sprache zur Repräsentation des Wissens kann durch unterschiedliche sprachliche Mittel Limitationen bei der Beschreibung analysierter Konzepte und Regeln hervorrufen. In diesem Fall müsste die Repräsentationssprache so angepasst werden, dass Wissen aus den Wissensquellen im Sinne der Autor*innen der Wissensquelle abbildbar ist. Im Anwendungsbeispiel werden Konzepte und ihre Beziehungen in der Web Ontology Language (OWL)

beschrieben. Diese Beschreibungslogik eignet sich, um terminologisches Expertenwissen konsistent und maschinenlesbar zu repräsentieren [36].

Eine Eigenschaft der Beschreibungslogik in Bezug auf die Formalisierung von Norm- und Sollverhalten ist, dass sie keine expliziten sprachlichen Mittel zur Repräsentation von Zeit bereitstellt. Diese Eigenschaft wurde adressiert, indem die Konzepte und Regeln bezüglich einer Szene [8] formuliert wurden.

Zusätzlich wurden für die Beschreibung der Szenen des funktionalen Szenarios Zonen [37] verwendet und ohne weitere parametrische Einschränkungen Szenenelemente zugewiesen. Die Zonierung und semantische Normverhaltensanalyse bilden einen iterativen Prozess, der in diesem Beitrag nicht ausgeführt wird und dessen Ergebnis als gegeben betrachtet wird.

Bei der ersten Konzeptualisierung der StVO ergibt sich ein in Abbildung 4 gezeigter taxonomischer Ausschnitt der Klassenstruktur (oder TBox, *terminological box*). Während die abstraktesten vier Klassen expertenbasiert erzeugt werden, ergibt sich die Dekomposition der Klassenstruktur für die Verkehrsinfrastruktur aus der StVO. Das Konzept des Fußgängerüberwegs wird hier als Tatbestand interpretiert, da an ihn die Rechtsfolge im Sinne des analysierten Abschnitts der StVO geknüpft ist. Zusätzlich kann die Klassenstruktur zum Beispiel durch eine domänenspezifische Konzeptualisierung der Betriebsumgebung nach [38–40] vorgegeben sein.

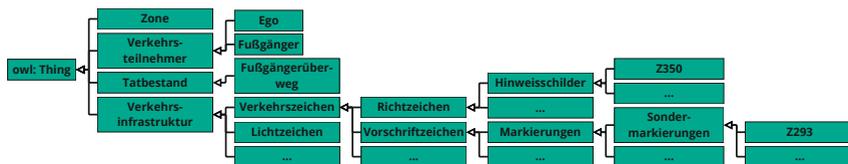


Abbildung 4: In der TBox (*terminological box*) der Ontologie wurde zunächst eine taxonomische Klassenstruktur aus der StVO abgeleitet und zusätzlich um Klassen erweitert, die für die Szenenrepräsentation benötigt werden.

Abbildung 5 zeigt für eine Szene des ersten Szenarios (vgl. Abbildung 3a) die modellierten Instanzen (ABox, *assertional box*) der Klassenstruktur der Ontologie. In der Szene befindet sich das Ego-Fahrzeug im westlichen Straßenast (Zone „blau 1“) und fährt in Richtung Osten auf die Kreuzung zu. Der Fußgängerüberweg befindet sich in Zone „rot“ und im Pfad des Ego-Fahrzeugs. Gemäß der StVO besteht ein Fußgängerüberweg aus einem entsprechenden Hinweisschild (Zeichen 350) und einer Markierung (Zeichen 293). Außerdem befindet sich ein Fußgänger im Einlaufbereich des Fußgängerüberwegs (Zone „grün 1“) und bewegt sich auf ihn zu.

Anschließend folgt die Konstruktion eines Regelkatalogs, der das Sollverhalten basierend auf den gewählten Wissensquellen in den betrachteten Szenarien formalisiert beschreiben soll. Die Konstruktion des Regelkatalogs besteht grundsätzlich aus dem Schritt der Regelableitung und der Regelstrukturierung und ggf. -verfeinerung. Die abgeleiteten Regeln können zunächst in natürlicher Sprache festgehalten werden. Bei der Formalisierung der dekomponierten Regeln wird die Notwendigkeit einer iterativen Methode deutlich: Da Regeln sich teilweise auf implizite Konzepte beziehen, ist es erst bei der Formalisierung der Regel möglich, diese impliziten Konzepte explizit in der Ontologie zu formalisieren. Im Beispiel ist das Konzept „erkennbar queren wollen“ nicht explizit beschrieben. Für

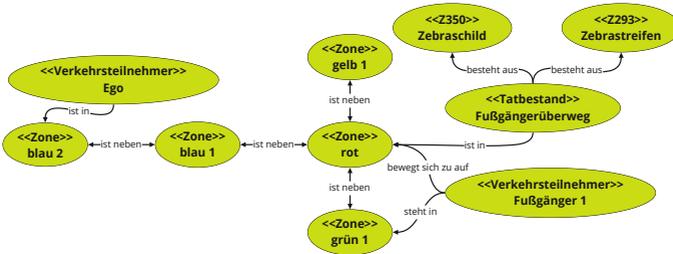


Abbildung 5: In der ABox (*assertional box*) der Ontologie sind Instanzen der Klassen aus der TBox modelliert, die das erste betrachtete Szenario repräsentieren.

die Anwendbarkeit der Regel sind dieses Konzept und die damit verbundenen Annahmen zentral, weshalb es für eine semantische Formalisierung explizit beschrieben werden muss.

In unserem Anwendungsfall wurde § 26 (1) StVO in vier Regeln zerlegt und formalisiert. Eine Hierarchisierung der Regeln wird in diesem Beispiel nicht gezeigt, da sich aus der StVO im Beispiel keine aufzulösenden Konflikte ergeben. Zwischen den Beschreibungsebenen der nicht-formalisierten, natürlich-sprachlichen Wissensquellen und den formalisierten, maschinenlesbaren Regeln kann der Übersetzungsprozess durch folgende semi-formale Regeln unterstützt werden:

- **Wenn** Zeichen 293 *und* Zeichen 350 **dann** gilt Fußgängerüberweg.
- **Wenn** Person in Zone grün 1 (Einlaufzone) **dann** Person will Überweg erkennbar benutzen.
- **Wenn** Fußgängerüberweg in Fahrweg *und* Person will erkennbar benutzen **dann** ist Überqueren zu ermöglichen.
- **Wenn** Regel 1 *und* Regel 2 *und* Regel 3 **dann** Halten in Zone blau 1 (Haltezone vor Fußgängerüberweg).

Die hier vorgestellte Ableitung von Regeln basiert auf dem Wissen, das durch das beispielhafte rechtswissenschaftliche Gutachten gewonnen wurde. Während der Erstellung des Gutachtens wurde iterativ das Vorhandensein von Konzepten und Regeln geprüft und so die Schnittstelle zwischen der Wissensquelle und der formalen Repräsentation hergestellt.

Im Anwendungsbeispiel wird als Notationssprache formaler Regeln die *Semantic Web Rule Language (SWRL)* [10] verwendet. Die implementierten SWRL-Regeln sind im Anhang dieses Artikels (Tabelle 1) aufgeführt.

Die formulierten Regeln werden im folgenden Abschnitt exemplarisch auf die zwei betrachteten Szenarien angewendet und das Ergebnis in Bezug auf das inferierte Sollverhalten auf Regelkonformität hin untersucht.

6 Evaluation der Beispielanwendung

Der letzte Schritt der semantischen Normverhaltensanalyse, die Überprüfung des formalisierten Wissens, sollte in einem Szenarienkatalog erfolgen. Für unser Beispiel erfolgt die

Evaluation des formalisierten Regelsatzes und der daraus resultierenden Schlussfolgerungen anhand des bereits diskutierten Szenarios und einem zusätzlichen Szenario, das eine Verdeckung im Einlaufbereich des Fußgängerüberwegs enthält.

Innerhalb des Inferenzprozesses werden die in SWRL definierten Regeln auf die Entitäten der ABox der OWL-Ontologie angewendet und logische Schlussfolgerungen berechnet. Als Ergebnis wird die Beziehung „anhalten_in“ zwischen dem Ego-Fahrzeug und der im Beispiel als Zone „blau 1“ bezeichneten Zone inferiert. Für die Analyse der Korrektheit der genutzten Regeln soll zukünftig eine Integration des definierten Regelwerks innerhalb eines Phänomen-Signal-Modells [19, 20] erfolgen.

Als Validierung der Übersetzung der Wissensquellen in die vorgestellte Ontologie und in den dazugehörigen Regelkatalog wird das inferierte Verhalten auf Basis von Expertenwissen und der durchgeführten rechtswissenschaftlichen Analyse überprüft. Hierbei fällt auf, dass das Ego-Fahrzeug bei regelkonformem Verhalten immer vor dem Fußgängerüberweg anhalten würde, wenn ein Fußgänger sich im Einlaufbereich befindet. In diesem einfachen funktionalen Szenario zeigt sich zum Beispiel bei der Berücksichtigung des erkennbaren Überquerungswunsches die Herausforderung der Ableitung und Konkretisierung von Regeln. Unter welchen Bedingungen ein Fußgänger tatsächlich als querungswillig gesehen werden kann, kann beispielsweise Gerichtsurteilen, Feldbeobachtungen oder Prädiktionsmodellen [41] entnommen werden. Um in diesem Beispiel nicht weitere Wissenquellen einbeziehen zu müssen, wurde die Annahme getroffen, dass ein im Einlaufbereich stehender Fußgänger erkennbar den Fußgängerüberweg queren will. Diese Annahme wird durch die entsprechende Regel explizit dokumentiert.

Die Analyse des zweiten funktionalen Szenarios zeigt eine weitere Herausforderung bei der Skalierbarkeit des Ansatzes innerhalb eines Szenarienkatalogs. Da das zweite Szenario bei der Konzeptualisierung und Regelkonstruktion nicht explizit berücksichtigt wurde, ist das Konzept der Verdeckung weder in der Ontologie noch in den Regeln berücksichtigt.

Eine automatisierte Prüfung fehlenden Wissens ist bisher nicht Teil des Ansatzes. Daher ist die expertenbasierte Überprüfung aller Szenarien notwendig und es können ausschließlich logische Fehler in der Ontologie und im Regelkatalog automatisiert festgestellt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die semantische Normverhaltensanalyse ist eine Methode zur durchgängigen, formalen Verhaltensspezifikation automatisierter Straßenfahrzeuge. Es wurde argumentiert, dass eine explizite Repräsentation des Norm- und Sollverhaltens einen Beitrag zur Absicherung automatisierter Straßenfahrzeuge in Bezug auf die Erklärbarkeit leisten kann.

Die vorgestellte Analyse ist als Fallbeispiel und ist nicht als rechtssichere Auslegung der StVO zu verstehen. Im Rahmen der Arbeit wurde ein methodischer Vorschlag erarbeitet, um Expert*innen verschiedener Domänen eine Schnittstelle bereitzustellen, damit Interpretationen von Wissensquellen wie der StVO sinngemäß, formal repräsentiert werden können.

Ein Vorteil des Ansatzes ist, dass die Bewertung des inferierten Sollverhaltens durch Expert*innen explizit in den iterativen Entwicklungsprozess einbezogen werden kann. Da die szenarienbezogene Bewertung als Stärke von Analysen durch den Menschen verstanden wird, kann der Ansatz zur semantischen Normverhaltensanalyse als Unterstützungsmittel zur Herleitung von Verhaltensregeln gesehen werden. Die Stärke der formalen Repräsentati-

on der Verhaltensregeln lässt sich insbesondere unter Berücksichtigung eines umfangreichen Szenarienkatalogs und der damit verbundenen Überprüfung von Widersprüchen im Sollverhalten prognostizieren.

Grenzen des Ansatzes ergeben sich beim Übergang zwischen der nicht-formalen und formalen Beschreibung von Verhalten. Die Interpretation von Verhaltensnormen und die Ableitung von Sollverhalten stellt – insbesondere bei der Auflösung von konfliktärem Wissen – eine Fehlerquelle dar. Die explizite Dokumentation von Interpretation an diesem Übergang ist wesentlich für die Argumentierbarkeit getroffener Entwurfsentscheidungen. Eine Herausforderung des offenen Kontextes, die der Ansatz nur eingeschränkt adressiert, ist die Vereinfachung der Realität bei der Verwendung eines szenarienbasierten Ansatzes. Die Formulierung von Verhaltensnormen kann zur Argumentierbarkeit von Annahmen in beobachteten kritischen Grenzfällen beitragen.

Zukünftige Forschung in diesem Kontext könnte die Anbindung semi-formaler Sprachen (vgl. [13]) untersuchen. Auch die Untersuchung weiterer Rechtsquellen und Rechtskontexte für die Anwendung der semantischen Normverhaltensanalyse stellt eine offene Herausforderung dar.

Danksagung

Diese Forschungsarbeiten wurden zum Teil im Rahmen des Projekts „VVMethoden“ durchgeführt. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung des Projekts durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Wir bedanken uns insbesondere bei Christian Lalitsch-Schneider (ZF Friedrichshafen AG) und Dr.-Ing. Christoph Höhmann (Mercedes-Benz Group AG) für die anregenden Diskussionen, sowie bei Prof. Dr. rer. nat. Markus Brandstätter (PROSTEP AG) für viel hilfreiches Feedback. Für die Übernahme des Lektorats danken wir Kim Steinkirchner (PROSTEP AG). Abschließend bedanken wir uns bei Hans Nikolaus Beck (ehem. Robert Bosch GmbH), der diese Arbeit fundamental geformt und begleitet hat.

Literatur

- [1] „Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems,“ Society of Automotive Engineers International, Geneva, Switzerland, Technical Report SAE J3016, 2021.
- [2] „Road vehicles – Safety of the intended functionality,“ International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, International Standard ISO 21448, 2022.
- [3] M. Nolte, S. Ernst, J. Richelmann und M. Maurer, „Representing the Unknown – Impact of Uncertainty on the Interaction between Decision Making and Trajectory Generation,“ in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, Hawaii, USA, 2018, S. 2412–2418. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569490.
- [4] A. Censi, K. Slutsky, T. Wongpiromsarn, D. Yershov, S. Pendleton, J. Fu und E. Frazzoli, „Liability, Ethics, and Culture-Aware Behavior Specification using Rulebooks,“ in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, ISSN: 2577-087X, 2019, S. 8536–8542. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794364.

- [5] R. C. Arkin, *Behavior-Based Robotics*, 1. Aufl. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1998.
- [6] M. J. Mataric und F. Michaud, „Behavior-based systems,“ in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano und O. Khatib, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, S. 891–909. DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5_39.
- [7] D. D. Walden, G. J. Roedler, K. Forsberg, R. D. Hamelin und T. M. Shortell, Hrsg., *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, 4. Aufl., Hoboken: Wiley, 2015.
- [8] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt und M. Maurer, „Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for Automated Driving,“ in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Gran Canaria, Spain, 2015, S. 982–988. DOI: 10.1109/ITSC.2015.164.
- [9] R. Graubohm, T. Stolte, G. Bagschik und M. Maurer, „Towards Efficient Hazard Identification in the Concept Phase of Driverless Vehicle Development,“ *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 1297–1304, 2020. DOI: 10.1109/IV47402.2020.9304780.
- [10] I. Horrocks, P. F. Patel-Schneider, H. Boley, S. Tabet, B. Grosz und M. Dean, „SWRL: A semantic web rule language combining OWL and RuleML,“ W3C Member submission, 2004.
- [11] P. Feth, R. Adler, T. Fukuda, T. Ishigooka, S. Otsuka, D. Schneider, D. Uecker und K. Yoshimura, „Multi-aspect safety engineering for highly automated driving: Looking beyond functional safety and established standards and methodologies,“ in *Developments in Language Theory*, M. Hoshi und S. Seki, Hrsg., Bd. 11088, Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 59–72. DOI: 10.1007/978-3-319-99130-6_5.
- [12] J. Bach, S. Otten und E. Sax, „Model based scenario specification for development and test of automated driving functions,“ in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2016, S. 1149–1155. DOI: 10.1109/IVS.2016.7535534.
- [13] P. Irvine, X. Zhang, S. Khastgir und P. Jennings, „Structured natural language for expressing rules of the road for automated driving systems,“ in *2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2023.
- [14] F. Glatzki, M. Lippert und H. Winner, „Behavioral Attributes for a Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) for the Development of Automated Driving Functions,“ in *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2021, S. 667–672. DOI: 10.1109/ITSC48978.2021.9564892.
- [15] F. Glatzki und H. Winner, „Inferenz von Verhaltensattributen der Verhaltenssemantischen Szeneriebeschreibung für die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen,“ in *14. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*, Berkheim, Germany, 2022.
- [16] M. Lippert, F. Glatzki und H. Winner, „Behavior-Semantic Scenery Description (BSSD) of Road Networks for Automated Driving,“ *arXiv:2202.05211 [cs, eess]*, 2022.

- [17] G. Bagschik, T. Menzel, C. Körner und M. Maurer, „Wissensbasierte Szenariengenerierung für Betriebsszenarien auf deutschen Autobahnen,“ in *12. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*, Walting im Altmühltal, 2018, S. 1–14.
- [18] M. Butz, C. Heinzemann, M. Herrmann, J. Oehlerking, M. Rittel, N. Schalm und D. Ziegenbein, „SOCA: Domain Analysis for Highly Automated Driving Systems,“ in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294438.
- [19] H. N. Beck, N. F. Salem, V. Haber, M. Rauschenbach und J. Reich, *Phänomen-Signal-Modell: Formalismus, Graph und Anwendung*, Number: arXiv:2108.00252, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2108.00252.
- [20] —, *Phenomenon-Signal Model: Formalisation, Graph and Application*, Number: arXiv:2207.09996, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2207.09996.
- [21] A. Rizaldi und M. Althoff, „Formalising Traffic Rules for Accountability of Autonomous Vehicles,“ in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2015, S. 1658–1665. DOI: 10.1109/ITSC.2015.269.
- [22] A. Rizaldi, J. Keinholtz, M. Huber, J. Feldle, F. Immler, M. Althoff, E. Hilgendorf und T. Nipkow, „Formalising and Monitoring Traffic Rules for Autonomous Vehicles in Isabelle/HOL,“ übers. von N. Polikarpova und S. Schneider, Ser. Integrated Formal Methods, Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 50–66.
- [23] D. Nikol und M. Althoff, „Die Formalisierung von Rechtsnormen am Beispiel des Überholvorgangs,“ *InTeR, Zeitschrift zum Innovations- und Technikrecht*, S. 6, 2019.
- [24] S. Maierhofer, A.-K. Rettinger, E. C. Mayer und M. Althoff, „Formalization of Interstate Traffic Rules in Temporal Logic,“ in *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2020, S. 752–759. DOI: 10.1109/IV47402.2020.9304549.
- [25] D. Hannah und S. Khastgir, „Proposal for an Approach to Defining Rules of the Road: United Kingdom Proposal,“ UNECE FRAV 17th Session, 2021.
- [26] C. Torens, U. Durak, F. Nikodem und S. Schirmer, „Formally bounding UAS behavior to concept of operation with operation-specific scenario description language,“ in *AIAA Scitech 2019 Forum*, San Diego, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. DOI: 10.2514/6.2019-1975.
- [27] M. Colledanchise und P. Ögren, „Behavior trees in robotics and AI: An introduction,“ *arXiv:1709.00084 [cs]*, 2018. DOI: 10.1201/9780429489105.
- [28] H.-H. Nagel und M. Arens, „’Innervation des Automobils’ und Formale Logik,“ in *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, Springer, 2005, S. 89–116.
- [29] T. Menzel, G. Bagschik und M. Maurer, „Scenarios for Development, Test and Validation of Automated Vehicles,“ in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2018, S. 1821–1827. DOI: 10.1109/IVS.2018.8500406.
- [30] G. Bagschik, T. Menzel, A. Reschka und M. Maurer, „Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen,“ in *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, Walting im Altmühltal, 2017, S. 125–135.
- [31] „Straßenverkehrs-Ordnung (StVO),“ Bonn, Verordnung BGBI. I, 2013, S. 367–427.