

Wissensbasierte Szenariengenerierung für Betriebsszenarien auf deutschen Autobahnen

G. Bagschik, T. Menzel,^{*} C. Körner[†] und M. Maurer[‡]

Zusammenfassung: Szenarienbasierte Testkonzepte, vorrangig für Simulationsumgebungen, können einen Beitrag zur Freigabe und Markteinführung automatisierter Fahrzeuge leisten. Kernbestandteil der Ansätze sind relevante Betriebsszenarien, welche in vielfältiger Variation die Repräsentativität der simulierten Testfälle gegenüber der realen Einsatzumgebung erhöhen. Die notwendigen Szenarien können durch Messfahrten, Expertenanalysen oder systematische Prozesse gewonnen werden. Eine breite Variation umfassend beschriebener Szenarien kann im Rahmen von Expertenanalysen oder Messfahrten nur mit hohem manuellem Aufwand erzeugt werden. In diesem Beitrag werden Ansätze zur Formalisierung von Wissen und zur wissensbasierten automatisierten Szenariengenerierung für Betriebsszenarien auf deutschen Autobahnen vorgestellt.

Schlüsselwörter: Automatisiertes Fahren, Ontologie, Szenarien, Testprozess

1 Einleitung

Wachenfeld und Winner [1] sagen Milliarden von notwendigen Kilometern für den streckenbasierten Test von automatisierten Fahrzeugen voraus. Das Gedankenexperiment geht von Testansätzen für Fahrerassistenzsysteme aus und prädiziert unter definierten Annahmen die benötigten Testumfänge für automatisierte Fahrfunktionen. Die resultierende hohe Anzahl zu fahrender Kilometer lässt sich als Notwendigkeit eines vielfältigen Szenarienraums interpretieren. Für verschiedene Testziele (z.B. Sicherheit oder Komfort) von automatisierten Fahrzeugen werden unterschiedlich ausgeprägte Szenarien benötigt. In einem risikobasierten Testprozess werden kritische Szenarien analysiert, wohingegen normale Betriebsszenarien für die Auslegung des Komforts einer Fahrfunktion benötigt werden. Für beide beispielhaften Testziele können aus einem allgemein formulierten Katalog von Betriebsszenarien relevante Szenarien als Grundlage für Testfälle identifiziert werden. Die Vorteile einer automatisierten Szenariengenerierung gegenüber der Sammlung von Szenarien, beispielsweise durch Messfahrten, sind zum einen die Nachvollziehbarkeit der Inhalte im erstellten Szenarienraum und zum anderen eine bessere Kosten- und Zeiteffizienz.

^{*}G. Bagschik und T. Menzel sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig (Email: {bagschik, menzel}@ifr.ing.tu-bs.de).

[†]C. Körner ist Masterabsolvent der Technischen Universität Braunschweig (Email: c.koerner@online.de).

[‡]M. Maurer ist Professor und Institutsleiter am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig (Email: maurer@ifr.ing.tu-bs.de).

Schuldt [2] stellt ausgehend von der Notwendigkeit neuer Testansätze einen Beitrag zu szenarienbasierten Testkonzepten für automatisierte Fahrzeuge in simulativen Umgebungen vor. Der von Schuldt et al. [3] vorgestellte *modulare virtuelle Testbaukasten* sieht vor, durch eine Sensitivitätsanalyse Einflüsse von Szenarien-Parametern auf den Testgegenstand abzuleiten. Ulbrich et al. [4] untersuchen die Begriffe Szene, Szenario und Situation und schlagen aufbauend auf diversen Vorarbeiten konsolidierte Definitionen im Bereich des automatisierten Fahrens vor. Weiterführend leiten Bagschik et al. [5] ausgehend von der Verwendung von Szenarien im Entwicklungsprozess drei Beschreibungsformen für Szenarien ab. *Funktionale Szenarien* stellen die höchste Abstraktionsebene dar. Die Inhalte eines funktionalen Szenarios sind sprachlich formuliert und somit für menschliche Experten im Entwicklungsprozess verständlich. Während des Entwicklungsprozesses kann der Inhalt eines Szenarios fortlaufend detailliert werden und logisch (Parameterraum in Wertebereichen) oder konkret (Auswahl konkreter Repräsentanten der Wertebereiche) beschrieben werden.

In der Fallstudie von Schuldt [2] werden in der Nomenklatur nach Bagschik et al. [5] mehrere konkrete Szenarien aus einem logischen Szenario erstellt, welches auf ein grob beschriebenes funktionales Szenario („Arbeitsstelle“) zurückzuführen ist [2, S. 184]. Schuldt [2] behandelt somit die Konkretisierung von logischen Szenarien zu konkreten Szenarien (vgl. [5]) im Rahmen der Testfallerstellung. Ein wichtiger Bestandteil von szenarienbasierten und simulativen Testansätzen ist die vorgelagerte Szenariengenerierung [2, S. 205].

In diesem Beitrag wird ergänzend zu Schuldt [2] ein Ansatz vorgestellt, der sprachlich gefasste Informationsquellen in einer Ontologie als Wissensbasis modelliert. Aus dieser Wissensbasis können automatisiert funktionale Szenarien generiert werden. Die erstellten funktionalen Szenarien bilden einen Beitrag für die Entwicklung und den Test automatisierter Fahrfunktionen.

Im Folgenden werden zunächst verwandte Arbeiten wissensbasierter Systeme im Bereich des automatisierten Fahrens vorgestellt. Darauf aufbauend wird die *wissensbasierte Szenariengenerierung* als Ansatz eingeführt. Im ersten Teil des Abschnitts 3 wird der Aufbau der Wissensbasis und anschließend der Prozess der Szenariengenerierung beschrieben. Der Artikel schließt mit einem Fazit und einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

2 Stand der Technik und verwandte Arbeiten

Bereits in den 1980er Jahren wurden wissensbasierte Ansätze zur natürlichsprachlichen Beschreibung von Verkehrsszenarien vorgestellt. Das System *Natürlichsprachliche Beschreibung von Objektbewegungen in einer Straßenszene* (NAOS) [6] interpretiert Bildfolgen ausgehend von einer extrahierten geometrischen Szenenbeschreibung. Aus diesen Daten werden anschließend Ereignisse extrahiert und diese unter Verwendung einer Wissensbasis interpretiert. Das Ergebnis der Interpretation wird zu einer sprachlichen Beschreibungen der Handlung des Szenarios überführt. Mehrere verwandte Arbeiten zur natürlichsprachlichen Beschreibung von Verkehrsszenarien in Bildfolgen stammen aus dem Sonderforschungsbereich (SFB) 314 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) *Künstliche Intelligenz und wissensbasierte Systeme* von 1985 bis 1995. Dort sind vor allem die Arbeiten um Prof. Nagel vom Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme der Universität Karlsruhe hervorzuheben (z.B. [7], [8] und zusammenfassend [9]). Die Vorarbeiten zu natürlichsprachlichen Beschreibungen von Bildfolgen bilden thematisch eine der Grundla-

gen zur Generierung von funktionalen Szenarien. In diesen Arbeiten wird die Bedeutung von Bildfolgen sprachlichen Ausdrücken zugeordnet, um diese für menschliche Experten von einer mathematischen Modellierung zu abstrahieren.

Dickmanns [10] stellt einen Ansatz zur Echtzeit-Interpretation von Bildfolgen in Fahrzeugsystemen vor. Dabei werden in weiteren Arbeiten [11] Annahmen über den Aufbau des Straßennetzwerks und die Bewegungen von Verkehrsteilnehmern in mathematische Modelle überführt. Welche Modelle miteinander kombiniert werden dürfen, wird durch Regeln in einer Wissensbasis hinterlegt. Aufgrund dieser Wissensbasis kann für konkrete Beobachtungen in einem Kamerabild die Zusammenstellung der gültigen Modelle gewählt werden. Mit der Zuordnung von mathematischen Modellen zu einem Objekt in der wahrgenommenen Welt kann eine Kopplung der Modelle zu einer *höhere* Bedeutung dargestellt werden. Diese Verknüpfung gibt einen Hinweis darauf, dass das zu modellierende sprachlich gefasste Hintergrundwissen des hier vorgestellten Ansatzes möglichst eindeutig auf Parametersätze abbildbar sein sollte.

Weiterhin werden wissensbasierte Systeme im Bereich des Szenenverständnisses von automatisierten Fahrzeugen angewandt. Die wissensbasierte Herangehensweise beim Szenenverständnis erlaubt es, gemessene Sensordaten um Kontextinformationen zu erweitern und somit logische Inferenz zu ermöglichen. Im Grundkonzept kann eine Verhaltensentscheidung auf eine Ontologie als Wissensrepräsentation zugreifen, um eine Szene auszuwerten und somit beispielsweise Fahrmanöver aufgrund semantischer Regeln einzuleiten [12]. In der Forschung und Entwicklung unterscheiden sich die vorgestellten Ontologien in ihren Inhalten sowie ihrer Komplexität. Nach Lattner et al. [12] können sprachlich gefasste Bestandteile einer Verkehrsszenenbeschreibung in einer Wissensbasis wie folgt gegliedert werden:

- Objekt-Klassen
- Topologische Information
- Räumliche Relationen
- Geschwindigkeitsinformation
- Distanz-Information
- Straßennetzwerk
- Verkehrssituationen
- Hintergrundwissen

Hummel et al. [13] nutzen ein wissensbasiertes System für das Szenenverständnis an urbanen Kreuzungen. Im Hintergrundwissen sind dafür Bestandteile von Kreuzungen mit geometrischen Klassen (Kreis, Gerade, Klothoide) verknüpft und die Relationen der Bestandteile über ein Regions-Verknüpfungskalkül (engl.: region connection calculus (RCC8)) beschrieben. Das Verknüpfungskalkül beschreibt Überschneidungsmöglichkeiten der geometrischen Klassen ähnlich der Mengenlehre aus der Mathematik. Mit diesem Konzept werden in dem vorgestellten Ansatz Teile-Ganze-Beziehungen der geometrischen Bestandteile modelliert. Beispiel einer konkreten Beobachtung dieser Beziehungen wäre eine Markierung die logisch einen *Bestandteil* eines Fahrstreifens darstellt und geometrisch daher *innerhalb* der Fahrbahnbegrenzung liegen muss. Um komplexe Kreuzungen zu erfassen, können einzelne Bestandteile semantisch miteinander verknüpft werden. Die Verknüpfungen sind beispielsweise *parallel zu*, *Nachbar von*, *Nachfolger von*, *gespiegelt gegenüber* und *nicht verbunden*. Diese Konzepte ermöglichen die Überprüfung von Sensormessungen gegenüber dem modellierten Hintergrundwissen, welche hier nicht weiter

betrachtet wird, da die Zuordnung von Sensordaten in dem hier gezeigten Ansatz keine Verwendung findet.

Armand et al. [14] nutzen ebenfalls ein wissensbasiertes System für das Szenenverständnis automatisierter Fahrzeuge. Der Fokus des modellierten Hintergrundwissens liegt auf Verkehrsteilnehmern und deren Interaktionen sowie Objekteigenschaften, die sich aus Objekthypothesen aus Sensordaten ableiten lassen. Objekteigenschaften bestehen aus einem Katalog von Fahrmanövern mit Bezug zur Infrastruktur oder anderen Verkehrsteilnehmern (*bewegt sich zu, folgt, ist nahe bei*) und mögliche Handlungen, die sich aus Regeln schlussfolgern lassen (*muss anhalten, wird erreichen, wird bremsen*).

Zhao et al. [15] verknüpfen die vorher vorgestellten Arbeiten zu einer einheitlichen Modellierung des Hintergrundwissens über städtische Szenarien. Darüber hinaus erweitern die Autoren das Wissen um formalisierte Verkehrsregeln wie Vorfahrtsregeln. Die Schlussfolgerungen aus Sensordaten werden in der Veröffentlichung mittels einer Anfragesprache (SPARQL) für die Verwendung unter Echtzeitbedingungen im Fahrzeug optimiert und evaluiert, was für den hier vorgestellten Ansatz nicht weiter von Bedeutung ist.

Aus den vorgestellten Arbeiten können zusammenfassend Teile der Wissensbasen für den hier vorgestellten Ansatz Beiträge zur Modellierung des Hintergrundwissens liefern. So werden in Teilen Objekteigenschaften und hierarchische Klassenkonzepte ähnlich zu Armand et al. und Hummel et al. verwendet. Die Formalisierung von Verkehrsregeln als Bestandteil der Wissensbasis ist von Zhao et al. inspiriert. Methodisch verfolgen die bisherigen Ansätze das Ziel, aus Szenarien (Beobachtungen zu Instanzen) des Verkehrsgeschehens Wissen über die aktuelle Situation des eigenen Fahrzeugs aus einer Wissensbasis (Hintergrundwissen) abzuleiten. Der hier beschriebene Ansatz leitet dagegen aus einer bestehenden Wissensbasis (Hintergrundwissen) mögliche funktionale Szenarien (Beobachtungen zu Instanzen) ab. Nach Kenntnisstand der Autoren existieren keine verwandten Ansätze zu diesem Vorgehen, insbesondere für die Generierung von sprachlich beschriebenen Verkehrsszenarien. Daher ist es notwendig, die Modellierung des Hintergrundwissen für die Erstellung von Szenarien zu erweitern, wie es im Folgenden vorgestellt wird.

3 Wissensbasierte Szenariengenerierung

Der Prozess zur wissensbasierten und systematischen Szenariengenerierung ist, wie in Abbildung 1 dargestellt, in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird sprachlich gefasstes Wissen über das Verkehrsgeschehen auf deutschen Autobahnen identifiziert und formalisiert. Das Ergebnis dieses Teilschritts ist eine Wissensbasis, die im hier vorgestellten Ansatz durch eine Ontologie in der *Web Ontology Language* (OWL) implementiert ist. Das Hintergrundwissen wird durch hierarchische Klassen und semantische Beziehungen und Restriktionen (Klassenbeziehungen) zwischen diesen Klassen modelliert. Ontologien ermöglichen weiterhin logische Inferenz (Schlussfolgerungen) durch sogenannte Reasoner¹. Als Grundlage für die Inferenz sind semantische Regeln (Semantic Web Rules) in Form von wenn-dann-Ausdrücken in der Ontologie hinterlegt. Reasoner sind in der Lage, Instanzen auf das Hintergrundwissen zuzuordnen und auf diese Weise aktuell geltende Regeln zu ermitteln. Dadurch können neue Beziehungen zwischen konkreten Instanzen in einem Szenario aus dem Hintergrundwissen geschlussfolgert werden.

¹Für den Begriff *Reasoner* existiert keine passende deutsche Übersetzung.

In diesem Beitrag wird die *Richtlinie zur Anlage von Autobahnen* (RAA) [16] als Fallbeispiel für die Formalisierung des Wissens über den Streckenbau auf deutschen Autobahnen genutzt. Aus der Wissensbasis werden im zweiten Teil der Szenariengenerierung automatisch und systematisch Szenarien durch Variation der Klassen und ihrer Instanzen abgeleitet. Die Variation geschieht unter Berücksichtigung von möglichen Zusammenstellungen und Einschränkungen, die durch die Wissensbasis vorgegeben sind. Die generierten Szenarien sind zum einen für Menschen lesbar und zum anderen für nachfolgende automatisierte Verarbeitungsschritte durch Rechnersysteme interpretierbar.

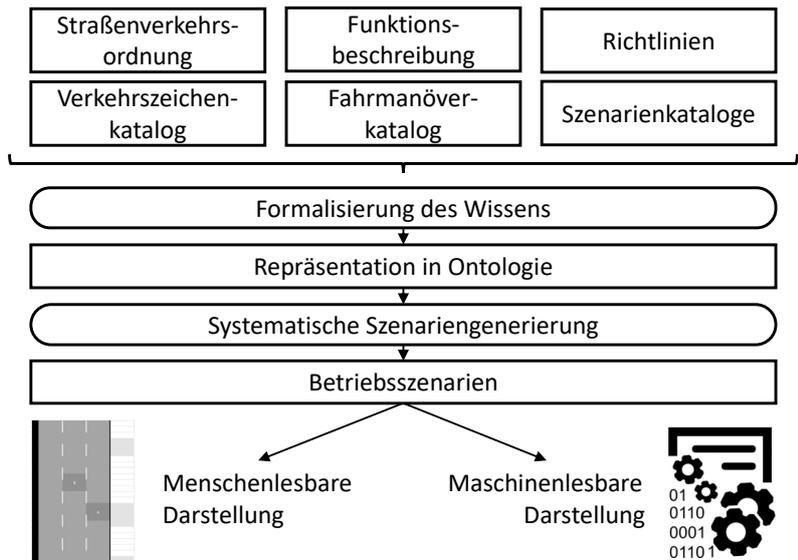


Abbildung 1: Prozessübersicht der wissensbasierten Szenariengenerierung. Abgerundete Rechtecke stellen Arbeitsschritte und normale Rechtecke Prozessergebnisse und Wissensquellen dar.

3.1 Modellierung von Hintergrundwissen

Das Hintergrundwissen in der Wissensbasis ist nach einem 5-Ebenen-Modell (Abbildung 2) strukturiert. Das Modell wurde aus den Vorarbeiten von Schuldt [3] für die Repräsentation in einer Ontologie und die automatisierte Generierung von funktionalen Szenarien angepasst.

Straßenebene Die erste Ebene beschreibt die Basisstrecke, auf der ein Szenario durchgeführt werden kann. Entgegen des Vorschlags von Schuldt [2] wird im hier vorgestellten Ansatz auf der ersten Ebene nur die Geometrie und die Topologie der Streckenabschnitte modelliert. Die Straßenausstattung wie statische Objekte oder Verkehrszeichen werden im Gegensatz zu Schuldt [2] gesondert auf der zweiten Ebene E2 betrachtet. Dies lässt die Generierung mehrerer Szenarien auf einer Basisstrecke durch Anpassung der statischen Bebauung und verschiedenen Verkehrsregeln wie Geschwindigkeitsbegrenzungen zu. In der Aufteilung der Ebenen verbirgt sich die Annahme, dass optionale Verkehrsregeln, die häufig durch Verkehrszeichen instanziiert werden, semantische Unterschiede für automatisierte Fahrzeuge mit Umfeldwahrnehmung und -interpretation und somit ein anderes



Abbildung 2: 5-Ebenen-Modell zur Strukturierung des Wissens über Szenarien basierend auf Schuldt [2]

Szenario ausmachen. Die Existenz der Elemente der Basisstrecke und ihre Strukturierung ist durch hierarchische Klassen in der Ontologie modelliert. Die Auslegung von Autobahnen wird in Entwurfsklassen (EKA), die jeweils mehrere Regelquerschnitte und ihre Elemente enthalten, unterteilt. Ein Streckenabschnitt besteht aus einer Richtungsfahrbahn und einigen teilweise optionalen Ausstattungselementen. Die Richtungsfahrbahn wird durch einen Regelquerschnitt der RAA instanziiert. Elemente der Regelquerschnitte wie Fahrstreifen und Seitenstreifen sind als gesonderte Klassen modelliert und werden über die Objektbeziehung *besteht aus* mit einer genauen Anzahl modelliert. So *besteht* ein Regelquerschnitt 36 beispielsweise aus *genau drei* Fahrstreifen pro Fahrtrichtung.

Straßenausstattung Die zweite Ebene modelliert die Straßenausstattung², welche die Begrenzungen der Fahrbahn, Verkehrsregeln und ihre Instanzierungen (Verkehrszeichen, Markierungen, Wechselzeichen) und statische Objekte des Szenarios enthält. In der Wissensbasis sind semantische Regeln (Semantic Web Rules) hinterlegt, welche Verkehrszeichen unter welchen Umständen auf den jeweiligen Regelquerschnitten angebracht sein dürfen.

Temporäre Beeinflussung Die dritte Ebene sieht konzeptionell die Modellierung von temporären Veränderungen der Ebenen E1 und E2 vor, welche in der vorliegenden Arbeit noch nicht umgesetzt ist. Arbeitsstellen wurden in den Vorarbeiten von Schuldt [2] als Beispiel zur Generierung von *logischen Szenarien* [5] genutzt. Teile des Regelwerks für Arbeitsstellen sind in der RAA enthalten und in den Richtlinien für die Absicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) [17] detailliert beschrieben.

²Benennung nach Hinweis durch Prof. Lutz Eckstein in persönlicher Kommunikation.

Bewegliche Objekte In der vierten Ebene sind bewegliche Objekte (vorrangig Verkehrsteilnehmer) und ihre Interaktionen beschrieben. Kategorien von Verkehrsteilnehmern (z.B. Pkw und Lkw) sind als Klassen der Ontologie modelliert. Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern sind als Fahrmanöver hinterlegt. Einen Katalog von notwendigen Fahrmanövern für ein vollständig automatisiertes Fahrzeug auf Abruf wurde von Reschka [18] basierend auf Tölle [19] und Nagel und Enkelmann [8] vorgestellt. Für den hier gezeigten Ansatz wurde der Katalog von Reschka um das Manöver *Zurückfallen* als Gegenteil zum *Annähern* erweitert. Mit dieser Erweiterung lassen sich Bedingungen von Relativgeschwindigkeiten für eine spätere Überführung in logische Szenarien explizit unterscheiden.

Umweltbedingungen Die fünfte Ebene beschreibt Umweltbedingungen bestehend aus Wetter, Jahreszeit und Tageszeit. Diese Elemente wurden durch hierarchische Klassen grob gegliedert (z.B. Regen, Schnee, Sonnenschein) oder diskretisiert (Morgen, Mittag, Abend, Nacht). Feinere Diskretisierungen sind in der Überführung zu logischen Szenarien vorgesehen, da die hier beschriebenen Stufen durch Parameter wie Stunden und Minuten quasi-kontinuierlich beschrieben werden können.

Klassenbeziehungen Neben der Modellierung von hierarchischen Klassenkonzepten zur Beschreibung des Straßenverkehrs werden Beziehungen zwischen diesen Klassen modelliert. In diesem Ansatz sind drei Arten von Beziehungen unterschieden: Implementierungsbeziehungen, Konstellationsbeziehungen und Manöverbeziehungen.

Implementierungsbeziehungen modellieren die einstellbaren Parameter Komplexitätslevel und Abstraktionslevel sowie die dazugehörigen Standardklassen. Jeder Klasse kann somit die Zugehörigkeit zu einem Komplexitäts- und Abstraktionslevel zugewiesen werden, was in Abschnitt 3.2 näher beschrieben ist.

Konstellationsbeziehungen sind weiter in Erstellungs- und Anordnungsbeziehungen unterschieden. Erstellungsbeziehungen beschreiben abstrakte (nicht „greifbare“) Klassen und deren Repräsentanten in der realen Umwelt. Die Konzepte dafür sind Teile-Ganze-Beziehungen (Regelquerschnitt *besteht aus* einer Anzahl von Elementen), Instanziierungen (Richtungsfahrbahn *wird instanziiert durch* Regelquerschnitt) und die Beschreibung von optionalen Bestandteilen wie Geschwindigkeitsbegrenzungen. Anordnungsbeziehungen beschreiben räumliche Relationen von Instanzen wie *folgt auf/gefolgt von*, *rechter/linker Nachbar* und *angebracht auf*.

Manöverbeziehungen sind für die Generierung von Fahrmanövern als Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmern notwendig. Diese Beziehungen beschreiben Positionsrelationen, Geschwindigkeitsrelationen und daraus resultierende Abstände im Umfeld des jeweiligen Verkehrsteilnehmers. Auf Grundlage dieser Informationen können bei der Szenarienerstellung Fahrmanöver automatisch geschlussfolgert werden (vgl. Abschnitt 3.2). Während Implementierungs- und Erstellungsbeziehungen vor der Szenariengenerierung als Hintergrundwissen modelliert werden, können Anordnungs- und Manöverbeziehungen erst nach Erstellung der Szenerie und Instanziierung der Verkehrsteilnehmer für jedes Szenario einzeln ausgewertet werden.

3.2 Systematische Szenariengenerierung

Das im vorherigen Abschnitt beschriebene Hintergrundwissen liefert die Grundlage für die systematische Szenariengenerierung. Im Folgenden werden zunächst die bei der Generierung einstellbaren *Parameter* beschrieben. Anschließend folgt eine Darstellung der Prozessschritte *Szenariengenerierung*, *Verkehrsteilnehmergenerierung*, *Szenarientwicklung* und *Export der Szenarien*.

Parameter Die Szenariengenerierung kann durch vier Parameter beeinflusst werden: Komplexitätsgrad, Abstraktionsgrad, Anzahl der Positionen pro Fahrstreifen und Anzahl der Verkehrsteilnehmer. Der Komplexitätsgrad der Szenariengenerierung gibt an, welche Klassen der 5 Ebenen in die Variationsmethode einbezogen werden. Bei einem niedrigen Komplexitätsgrad werden beispielsweise Verkehrsteilnehmer der Klasse Pkw und Knotenpunkt-freie Streckenabschnitte generiert. Mit steigendem Komplexitätsgrad werden Verkehrsteilnehmer wie Lkw und Busse und Regelquerschnitte auf Brücken und in Tunneln während der Generierung berücksichtigt.

Der Abstraktionsgrad gibt an, welche Subklassen der durch den Komplexitätsgrad zulässigen Superklassen variiert werden. In der abstraktesten Konfiguration werden beispielsweise nur Streckenabschnitte mit zwei Fahrstreifen und nachgiebigen Rückhaltesystemen generiert. Mit sinkendem Abstraktionsgrad werden mehr Variationsmöglichkeiten (drei Fahrstreifen und starre Begrenzungen) in die Variation integriert. Für jede Superklasse kann eine Subklasse dabei als Standard-Ausprägung gewählt werden, welche zum Beispiel durch statistische Analysen („Standard-Autobahn“) oder eine besondere Bedeutung für die Szenariengenerierung bestimmt werden kann. Die Standardklassen werden genutzt, um für jede Ebene in der Klassenhierarchie mindestens einen Repräsentanten auszuwählen, auch wenn die Szenariengenerierung mit einem hohen Abstraktionsgrad konfiguriert ist. Abbildung 3 zeigt die Parameter Komplexitätsgrad und Abstraktionsgrad in der hierarchischen Modellierung des Hintergrundwissen. Die Parameter Anzahl der Positionen und Anzahl der Verkehrsteilnehmer werden in den nächsten Absätzen erläutert.

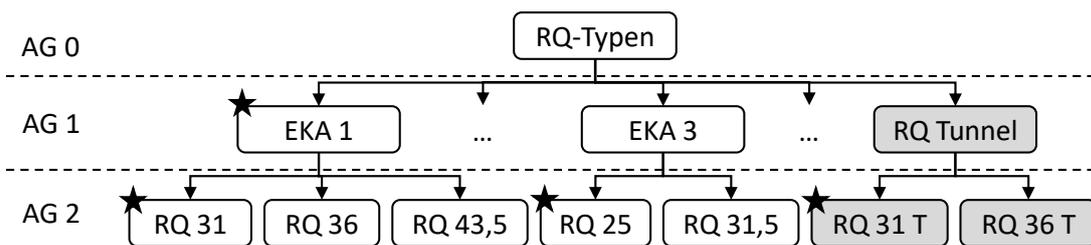


Abbildung 3: Einfluss der Parameter der Szenariengenerierung. Rechtecke (weiß = Komplexitätsgrad 1, grau = Komplexitätsgrad 2) stellen Klassen der Ontologie dar. Ebenen im Bild bilden Abstraktionsgrad (0 = größte Abstraktion) ab. Mit Stern markierte Klassen sind Standardklassen. Abkürzungen: Entwurfsklasse (EKA), Regelquerschnitt (RQ), Abstraktionsgrad (AG)

Szenariengenerierung Im ersten Schritt der Szenariengenerierung wird ermittelt, welche zulässigen Bestandteile die Szenarien enthalten. Welche Bestandteile in der Szenariengene-

rierung berücksichtigt werden sollen, hängt von der Konfiguration des Komplexitäts- und des Abstraktionsgrads ab. Dazu werden die Ebenen E1 und E2 des 5-Ebenen-Modells ausgewertet. Die Auswertung des Hintergrundwissens beginnt bei der abstrakten Klasse *Szene*, welche unter anderem mindestens einen Streckenabschnitt zur Instanziierung benötigt. Streckenabschnitte sind über die Klassenbeziehung *instanziert durch* semantisch zu Richtungsfahrbahnen und somit mit den Regelquerschnitten verknüpft [16, Kap. 4]. Die Kombinationen der Elemente werden gemäß der Konfiguration erzeugt und in einem *Instanziierungsgraphen* gespeichert. Mehrere Möglichkeiten der Kombination in einer Klasse ergeben dabei mehrere Verzweigungen im resultierenden Graphen. Für die in Abbildung 3 gezeigten Konfiguration würden für die Parameter Abstraktionsgrad AG 1 und Komplexitätsgrad KG 1 Szenarien mit den Regelquerschnitten RQ 31 (aus der Entwurfsklasse EKA 1) und RQ 25 (aus der Entwurfsklasse EKA 3) erzeugt werden. Bei Abstraktionsgrad AG 2 hingegen wären alle Regelquerschnitte der Entwurfsklassen EKA 1 und EKA 3 in den resultierenden Szenarien enthalten.

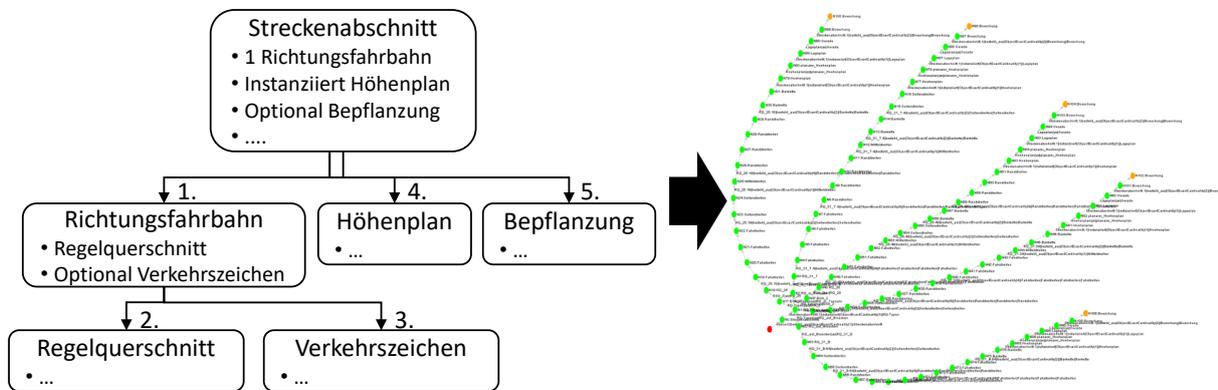


Abbildung 4: Auswertung des Hintergrundwissens mit Reihenfolge (Zahlen an Pfeilen) und Ausschnitt des resultierenden Instanziierungsgraphen

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Reihenfolge der Auswertung und einen Ausschnitt des resultierenden Graphen der Auswertung des Hintergrundwissens gemäß des konfigurierten Abstraktions- und Komplexitätsgrads. Neben den Bestandteilen der Szenerie aus der RAA wird die konfigurierte Anzahl von Positionen pro Fahrstreifen als Instanzen in den Graphen eingefügt. Diese Positionen sind für die nachfolgende Generierung von Verkehrsteilnehmern notwendig und werden räumlich den Fahrstreifen und sich selbst zugeordnet. Jeder Pfad durch den Graphen stellt abschließend die enthaltenen Elemente einer Szenerie dar, die für die Szenariengenerierung relevant sind. Für die weiteren Prozessschritte werden aus allen Bestandteilen des Graphen konkrete Instanzen mit eindeutiger Kennung (beispielsweise Fahrstreifen\$1) erstellt.

Die Beschreibung eines Szenarios beinhaltet neben der Existenz von Instanzen der Bestandteile auch deren räumliche Relationen [20, Kap. 4.2]. Dafür werden Instanzen des Graphen überprüft, welche mit einer oder mehreren Anordnungsbeziehungen modelliert sind. Die Reihenfolge der Auswertung der Klassenbeziehungen stellt eine entscheidende Rolle dar. Zunächst wird eine einfache Anordnung durchgeführt und die Individuen identifiziert, welche „Ganze“-Konzepte (Superklassen) von Teile-Ganze-Beziehungen darstellen. „Teile“-Konzepte sind durch die jeweiligen Subklassen modelliert. In einem Teile-Ganze-Konstrukt sind Prioritäten der Anordnung modelliert, welche für die Bestimmung der

Reihenfolge genutzt werden. Auf diese Weise steht fest, in welcher Reihenfolge die Restriktion für die Anordnung der Instanzen ausgewertet werden müssen. Beispielsweise werden in einem Regelquerschnitt erst die Anordnungen der Fahrstreifen zueinander, danach die Anordnung von Seiten- und Randstreifen und abschließend optionale Elemente generiert. Im zweiten Schritt der Anordnung werden übergreifende Zusammenhänge der einzelnen Teile-Ganze-Konstrukte erzeugt. Dazu gehören die fahrstreifenübergreifenden Relationen von Positionen in den Fahrstreifen und Markierungen. Die übergreifenden Beziehungen können mithilfe von modellierten semantischen Regeln durch einen Reasoner automatisch geschlussfolgert werden.

Als Ergebnis der Teilschritte der Szenerieerstellung liegen Instanzen der zulässigen Ausprägungen der Szenerie mit räumlichen Relationen vor (Abbildung 5).

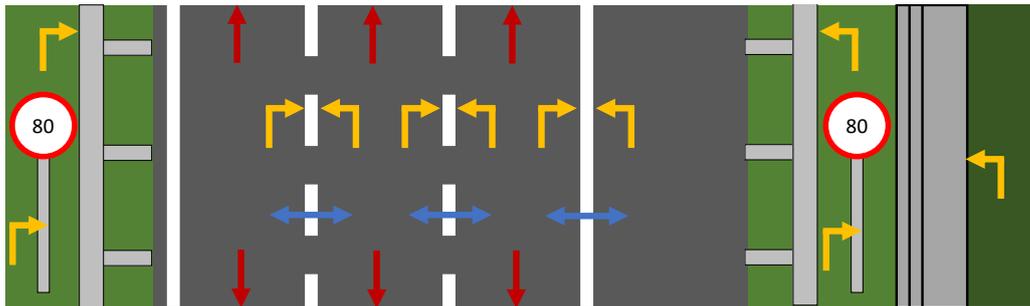


Abbildung 5: Ausschnitt der Anordnung von Szenerieelementen. Blaue Pfeile: *rechts/links*, orange Pfeile: *angebracht auf*, rote Pfeile: *folgt auf/gefolgt von*.

Verkehrsteilnehmergenerierung Die Generierung von Verkehrsteilnehmern beginnt analog zur Erstellung der Szenerie. Dabei werden zulässige Fahrzeugklassen und deren Kombinationen als Instanziierungsgraph gespeichert und in Instanzen überführt. Bei drei Fahrzeugen mit Pkw und Lkw ist es beispielsweise möglich, drei Pkw, zwei Pkw und einen Lkw, einen Pkw und zwei Lkw und drei Lkw zu erzeugen. Anschließend werden die Instanzen der Verkehrsteilnehmer in allen Permutationen auf den vorhandenen Positionen der Fahrstreifen verteilt. Dopplungen werden durch die Permutation mit Wiederholung (ohne Reihenfolge) vermieden. Semantische Dopplungen liegen vor, wenn auf funktionaler Ebene kein Unterschied der Szenarien vorhanden ist: Bei zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen ist kein Unterschied vorhanden, wenn die Fahrzeuge der gleichen Fahrzeugklasse angehören ($PKW\$1$ vor $PKW\$2 = PKW\2 vor $PKW\$1$). Wenn beide Fahrzeuge unterschiedlichen Klasse angehören, bedeutet dies einen Unterschied für das entstehende Szenario ($LKW\$1$ vor $PKW\$1 \neq PKW\1 vor $LKW\$1$). Dieses Vorgehen führt zu einer Reduktion der Szenarienmenge bei gleicher qualitativer Aussagekraft des Szenarienkatalogs. Aufgrund der resultierenden räumlichen Verteilung der Verkehrsteilnehmer können Fahrmanöver geschlussfolgert werden. Jedes Fahrmanöver aus dem Fahrmanöverkatalog (Abschnitt 3.1) ist in einem Satz von semantischen Regeln (Semantic Web Rules) formalisiert. Durch die Einzelbetrachtung jedes Fahrzeugs können mehrere resultierende Fahrmanöver für ein Szenario erzeugt werden. In Abbildung 6 hat das vordere Fahrzeug 2 nach Auswertung der Regelsätze nur die Möglichkeit, dem Fahrstreifen weiter zu folgen (grüner Pfeil), da das Rechtsfahrgebot in den Manövern berücksichtigt wird. Fahrzeug 1 hingegen hat die Möglichkeiten, Fahrzeug 2 zu folgen (grüner Pfeil), sich Fahrzeug 2 anzunähern

(violetter Pfeil) und einen Fahrstreifenwechsel nach links durchzuführen (roter Pfeil). Die Manöver der Fahrzeuge sind ebenfalls durch einen Reasoner automatisch geschlussfolgert.

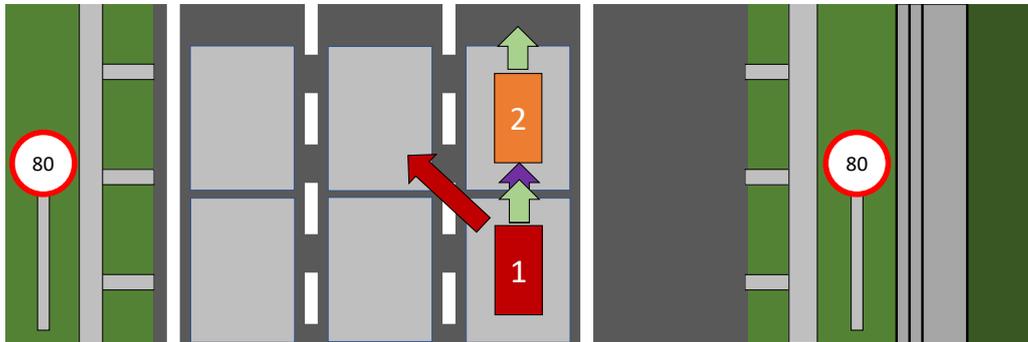


Abbildung 6: Mögliche Fahrmanöver in überladener Startszene. Grün: Folgen, violett: Annähern, rot: Fahrstreifenwechsel.

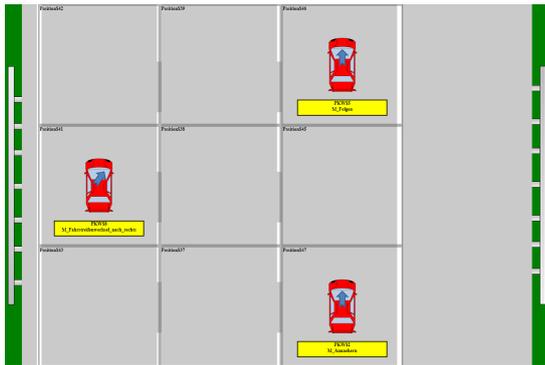
Szenarientwicklung Aus der *überladenen* Startszene können im nächsten Prozessschritt mögliche Endszene abgeleitet werden, wodurch nach der Nomenklatur von Ulbrich et al. [4] Szenarien entstehen. Aus den überladenen Startszene werden dazu erst alle Variationen von einzelnen Manövern der Verkehrsteilnehmer ausgewählt, woraus eine Vielzahl von potenziellen *Startszene* entsteht. Im Beispiel aus Abbildung 6 ergeben sich drei Startszene bei denen Fahrzeug 2 immer das Manöver *Folgen* zugeordnet wird und Fahrzeug 1 jeweils eins der aufgezählten Manövern ausführt. Für die Inferenz zu einer Endszene müssen den Verkehrsteilnehmern aufgrund ihrer aktuellen Manövern Relativgeschwindigkeiten zugeordnet werden. Fahrzeug 2 bekommt im Beispiel die Geschwindigkeit v_2 zugeordnet. Aus den Manövern von Fahrzeug 1 ergeben sich dann Bedingungen für die Relation von v_1 zu v_2 wenn Fahrzeug 2 dem Fahrstreifen folgt:

- Fahrzeug 1 folgt Fahrzeug 2: $v_1 = v_2$
- Fahrzeug 1 nähert sich Fahrzeug 2 an: $v_1 > v_2$
- Fahrzeug 1 leitet Fahrstreifenwechsel nach links ein: $v_1 > v_2$

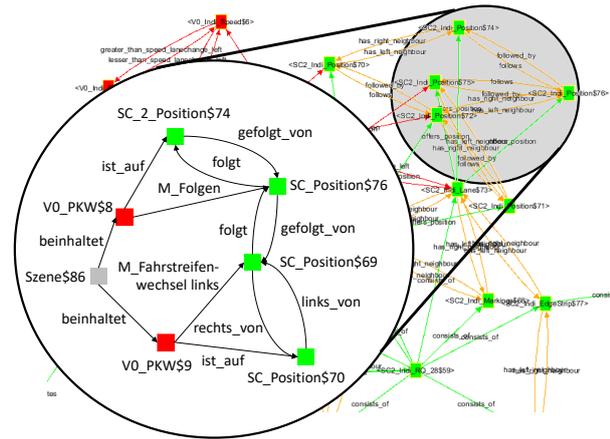
Auf Grundlage der Relativgeschwindigkeiten kann die zugehörige *Endszene* ermittelt werden. Das langsamste Fahrzeug im Szenario wird dazu eine logische Position in Fahrtrichtung weiter gesetzt und alle anderen Fahrzeug aufsteigend ihrer Geschwindigkeiten mehrere Positionen. Die virtuellen Pfade der Verkehrsteilnehmer über das Positionsgitter werden auf Kollisionen überprüft und bei Vorhandensein einer Kollision als nicht valide Endszene markiert.

Abschließend liefert die Szenariengenerierung umfassend sprachliche beschriebene Szenarien mit einer Start- und einer Endszene sowie Relationen der Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer ohne dabei konkrete Werte festzulegen. Die Parametrierung von Wertebereichen und einzelnen Repräsentanten erfolgt im Konzept nach Bagschik et al. [5] bei der Überführung zu logischen und konkreten Szenarien. Ein Beitrag dazu findet sich in diesem Tagungsband mit dem Titel „Detaillierung einer stichwortbasierten Szenariobeschreibung für die Durchführung in der Simulation am Beispiel von Szenarien auf deutschen Autobahnen“ von Menzel et al. [21].

Export der Szenarien Wie eingangs motiviert sollen die Szenarien in eine Menschen-lesbare und eine technische Darstellung exportiert werden. Für die Menschen-lesbare Darstellung ist eine abstrahierte HTML-basierte Visualisierung umgesetzt (Abbildung 7a). Die Anordnung der Bestandteile des Szenarios werden in ein HTML-Raster überführt und jeweils eine Grafik für eine Klasse der Ontologie angezeigt. Die Grafiken sind für jede Klasse einzeln erstellt worden (Fahrstreifen, Fahrzeuge und Rückhaltesysteme) oder aus vorhandenen Katalogen (Verkehrszeichen) übernommen. Verkehrsteilnehmer werden je nach Manöver mit einem Richtungspfeil markiert und alle Elemente sind mit der eindeutigen Kennung annotiert. Die technische Darstellung ist mithilfe eines vollständig ver-



(a) HTML-basierte Visualisierung für abstrahierte Übersicht



(b) Szenariengraph als detaillierte sprachliche Beschreibung

Abbildung 7: Visualisierung der funktionalen Szenarien

knüpften *Szenariengraph* (Abbildung 7b) dargestellt. Jeder Knoten des Graphen stelle eine Instanz mit eindeutiger Kennung dar. Die Verknüpfungen zwischen den Knoten zeigen die erstellten und geschlussfolgerten Objektbeziehungen. In dieser Darstellung ist ein Szenario über die Start- und die Endszene auf dem größten Detaillevel beschrieben und aufgrund der zahlenmäßigen Komplexität für den Menschen zwar verständlich jedoch nicht intuitiv zu verarbeiten.

4 Fazit und Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Ansatz ist es möglich, funktionale Szenarien nach Bagschik et al. [5] automatisiert in großer Vielfalt systematisch zu erstellen. In einer ersten Studie wurden 12.475 Szenarien mit jeweils vier Verkehrsteilnehmern und vier Positionen pro Fahrstreifen auf mehreren Regelquerschnitten erzeugt. Diese Zahl ließe sich durch Variation der Infrastruktur und einer größeren Anzahl von Verkehrsteilnehmern fast beliebig erhöhen. Aus der Studie wurden 700 Szenarien einzeln auf Richtigkeit und Vollständigkeit gegenüber dem modellierten Wissen verifiziert. Fokus der Auswertung liegt einerseits auf Szenarien mit komplexer Infrastruktur und andererseits auf Szenarien mit komplexen Interaktionen der Verkehrsteilnehmer.

Die Vorteile der Szenariengenerierung sind die automatische Erstellung und der nachvollziehbare Inhalt der Szenarien. So können die etwa 300 modellierten Klassen effizienter

auf fehlende Aspekte untersucht werden als der resultierende Szenarienkatalog. Der Fokus der aktuell modellierten Wissensbasis liegt auf *Normalszenarien* auf deutschen Autobahnen. Im Gegensatz zu potenziell kritischen Szenarien werden sich überschneidende Pfade von Fahrmanövern bei der Szenarientwicklung und nicht zu erwartende Aktionen (plötzliche Fahrstreifenwechsel bei Rechtsfahrgebot) nicht generiert. Solche Fälle können jedoch durch Anpassung der Regeln der Ontologie nachvollziehbar hinzugefügt werden. Kritische Szenarien, in denen geringe Abstände und hohe Relativgeschwindigkeiten von Interesse sind, können im Rahmen der Parametrierung der Fahrmanöver bei der Konvertierung zu logischen und konkreten Szenarien erzeugt werden [21].

Einschränkungen des Ansatzes ist, dass für die Modellierung des Hintergrundwissens und den systematischen Erstellungsprozess Vereinfachungen und Abstraktionen notwendig sind. So werden bei der Generierung von Verkehrsteilnehmern beispielsweise keine Fahrzeugdimensionen berücksichtigt, sodass zwei Pkw neben einem Lkw nicht in der logischen Positionierung erstellt werden können.

In Zusammenhang mit den Arbeiten von Menzel et al. kann der hier vorgestellte Ansatz einen Beitrag zur Entwicklung und zum szenarienbasierten Testansatz von automatisierten Fahrzeugen leisten. Die Verwendung von quantitativen Szenarienkatalogen als Grundlage für Testfälle ist aktuell Fokus der weiteren Arbeiten am Institut für Regelungstechnik.

Literatur

- [1] W. Wachenfeld und H. Winner. “Die Freigabe des autonomen Fahrens”. In: *Autonomes Fahren*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015, S. 439–464.
- [2] F. Schuldt. “Ein Beitrag für den methodischen Test von automatisierten Fahrfunktionen mit Hilfe von virtuellen Umgebungen”. Diss. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2017.
- [3] F. Schuldt, F. Saust, B. Lichte, M. Maurer und S. Scholz. “Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen”. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, Deutschland, 2013.
- [4] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt und M. Maurer. “Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren”. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*. Bd. 10. Walting im Altmühltal, Deutschland: Uni-DAS e. V., 2015, S. 105–117.
- [5] G. Bagschik, T. Menzel, A. Reschka und M. Maurer. “Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen”. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*. Bd. 11. Walting im Altmühltal, Deutschland: Uni-DAS e.V., 2017, S. 125–135.
- [6] B. Neumann und H.-J. Novak. “NAOS: Ein System zur natürlichsprachlichen Beschreibung zeitveränderlicher Szenen”. In: *Informatik Forschung und Entwicklung 1* (1986), S. 83–92.

- [7] G. Herzog, C.-K. Sung, E. André, W. Enkelmann, H.-H. Nagel, T. Rist, W. Wahls-ter und G. Zimmermann. “Incremental Natural Language Description of Dynamic Imagery”. In: *Wissensbasierte Systeme* 227 (1989), S. 153.
- [8] H.-H. Nagel und W. Enkelmann. “Generic road traffic situations and driver support systems”. In: *Proceedings of the 5th PROMETHEUS Workshop*. München, Deutsch-land, 1991.
- [9] M. Arens, R. Gerber und H.-H. Nagel. “Conceptual Representations between Video Signals and Natural Language Descriptions”. In: *Image and Vision Computing* 26.1 (2008), S. 53–66.
- [10] E. D. Dickmans. “Subject-Object Discrimination in 4D Dynamic Scene Interpreta-tion for Machine Vision”. In: *Workshop on Visual Motion 1989 Proceedings*. 1989, S. 298–304.
- [11] D. Dickmanns. “Knowledge Based Real-Time Vision”. In: *IFAC Proceedings Volumes* 28.11 (1995), S. 13–18.
- [12] A. D. Lattner, J. D. Gehrke, I. J. Timm und O. Herzog. “A Knowledge-Based Approach to Behavior Decision in Intelligent Vehicles”. In: *2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Las Vegas, NEV, USA, 2005, S. 466–471.
- [13] B. Hummel, W. Thiemann und I. Lulcheva. “Scene Understanding of Urban Road Intersections with Description Logic”. In: *Dagstuhl Seminar Proceedings*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik, 2008.
- [14] A. Armand, D. Filliat und J. Ibañez-Guzman. “Ontology-Based Context Awareness for Driving Assistance Systems”. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Dearborn, MI, USA, 2014, S. 227–233.
- [15] L. Zhao, R. Ichise, Y. Sasaki, Z. Liu und T. Yoshikawa. “Fast Decision Making Using Ontology-Based Knowledge Base”. In: *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Götheborg, Schweden, 2016, S. 173–178.
- [16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. *Richtlinie für die Anlage von Autobahnen*. 2008.
- [17] Bundesministerium für Verkehr. *Richtlinien für die Absicherung von Arbeitsstellen an Straßen*. 1995.
- [18] A. Reschka. “Fertigkeiten- und Fähigkeitengraphen als Grundlage des sicheren Be-triebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung”. Diss. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2017.
- [19] W. Tölle. *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*. Fortschritt-Berichte VDI. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- [20] H.-J. Novak. *Textgenerierung Aus Visuellen Daten: Beschreibungen von Straßen-szenen*. Hrsg. von W. Brauer. Bd. 142. Informatik-Fachberichte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1987.
- [21] T. Menzel, G. Bagschik, L. Isensee, A. Schomburg und M. Maurer. “Detaillierung einer stichwortbasierten Szenariobeschreibung für die Durchführung in der Simu-lation am Beispiel von Szenarien auf deutschen Autobahnen”. In: *Workshop Fahr-erassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*. Bd. 12. Walting im Altmühltal, Deutschland: Uni-DAS e.V., 2018.