

# Inferenz von Verhaltensattributen der Verhaltenssemantischen Szeneriebeschreibung für die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen

Felix Glatzki\* und Hermann Winner†

**Zusammenfassung:** Ein entscheidender Schritt für den Sicherheitsvalidierungsprozess von hochautomatisierten Fahrzeugen (HAF) ist die Definition der Operational Design Domain (ODD). Die Verhaltenssemantische Szeneriebeschreibung ermöglicht eine explizite Beschreibung der verhaltensrelevanten Information einer statischen Verkehrsumgebung. Diese Information ist als Teil der ODD wertvoll für die Spezifikation des Systems. Wir zeigen wie die Verhaltensattribute basierend auf der vorliegenden Szenerie anhand von Regeln bestimmt werden. In einem Anwendungsbeispiel werden diese Regeln zur automatisierten Ableitung der Attribute implementiert. Dies ermöglicht die universelle Erfassung der Verhaltensregeln von Szenerien als Basis zur Charakterisierung der ODD und als Grundlage für die Bewertung der Verkehrsregelkonformität von HAF.

**Schlüsselwörter:** Automatisiertes Fahren, Operational Design Domain, Szeneriebeschreibung, Regelkonformität

## 1 Einleitung

Die Sicherheitsfreigabe von hochautomatisierten Fahrzeugen (HAF) ist immer noch eine ungelöste Herausforderung. Aktuelle Ansätze zum Nachweis der Sicherheit solcher Systeme erfordern aufgrund des Fehlens einer geschlossenen funktionalen Spezifikation einen wirtschaftlich nicht vertretbaren Aufwand [1]. Neben der Forderung nach Kollisionsfreiheit muss das Verhalten eines automatisierten Fahrzeugs verkehrsregelkonform sein. Hierfür ist es notwendig abzugrenzen, welches Verhalten regelkonform ist und welches nicht. Grundsätzlich werden Verkehrsregeln durch eine Verkehrsordnung vorgegeben (in Deutschland durch die Straßenverkehrsordnung (StVO)). Abhängig von der örtlichen Szenerie (Definition nach [2][3]) werden die vorgegebenen Regeln durch vorliegende Elemente (bspw. Verkehrszeichen) instanziiert und beschränken das Fahrzeugverhalten in dieser Szenerie. Im Betrieb muss ein automatisiertes Fahrzeug die Verhaltenseinschränkungen innerhalb eines gewissen Horizonts nach vorne entlang der geplanten Route kennen und verstehen, um die Verkehrsregeln zu befolgen. Die Beschreibung der Szenerie, so wie sie ein Mensch wahrnimmt, führt zu einer hohen Komplexität hinsichtlich der beschriebenen Elemente, während

---

\* Felix Glatzki ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt (e-mail: felix.glatzki@tu-darmstadt.de).

† Hermann Winner ist Professor für Fahrzeugtechnik an der TU Darmstadt, Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt (e-mail: hermann.winner@tu-darmstadt.de).

der daraus resultierende Informationsgehalt hinsichtlich der Verhaltenseinschränkungen für ein Fahrzeug erheblich geringer ist. Dieses Wissen ist dann nur implizit in der Beschreibung der Elemente vorhanden und muss daraus abgeleitet werden.

Glatzki et al. [4] stellen Verhaltensattribute für eine Verhaltenssemantische Szeneriebeschreibung (Behavior Semantic Scenery Description, BSSD) vor. Diese Verhaltensattribute stellen die Grenzen des legalen Verhaltens explizit in semantischer Form zur Verfügung und knüpfen die Verhaltensregeln direkt an die Szenerie. Durch den Abstraktheitsgrad der Attribute ist die Anwendung nicht nur auf lokale Szenarien beschränkt, sondern ermöglicht eine Anwendung in verschiedenen, vielfältigen Verkehrsbereichen. In Tab. 1 werden alle für den weiteren Verlauf dieses Beitrages wichtigen Begrifflichkeiten aus der Veröffentlichung aufgelistet und ihre Bedeutung dargelegt. Für eine detaillierte Erklärung ist auf [4] verwiesen.

Die explizite Verfügbarkeit der Verhaltensgrenzen durch BSSD, ermöglicht verschiedene Anwendungsfälle. Zunächst dient es als Basis zur Charakterisierung und Auswahl der Operational Design Domain (ODD) [5] für HAF, da hiermit Verhaltensbeschränkungen konkret vorliegen und somit die benötigten Fähigkeiten eines Fahrzeugs in der Entwicklung damit abgeglichen und ein- bzw. ausgeschlossen werden können. Darauf basierend besteht die Möglichkeit, systematisch Anforderungen an HAF ausgehend von der ODD abzuleiten, wofür Lippert und Winner [6] eine Methodik vorstellen. Denkbar ist auch ein Einsatz als Vorgabe für Verhaltensplanungsalgorithmen, die durch die universelle Darstellung der Verhaltensgrenzen in Gebieten mit unterschiedlichen Regelwerken eingesetzt werden können, ohne große Anpassungen vorzunehmen. Zuletzt besteht das Ziel, die mit den Verhaltensattributen verbundenen Regeln zu formalisieren und als Testkriterien für die Verkehrskonformität zu nutzen.

Gerade für die Anwendung auf große Streckennetze bzw. den Einsatz innerhalb von Verhaltensplanungsalgorithmen, ist die automatisierte Ableitung der Verhaltensattribute von hoher Bedeutung. Hierdurch können große Datenmengen in kurzer Zeit unter Ausschluss von menschlichen Fehlern bearbeitet werden. In dieser Veröffentlichung legen wir die Regeln zur Ableitung der Verhaltensattribute dar. Durch Hinterlegung der Regeln innerhalb der Verhaltenssemantischen Szeneriebeschreibung von gesamten Streckennetzen (Verhaltenskarte), ist die benötigte Kenntnis der Verhaltenseinschränkungen entlang der geplanten Route explizit verfügbar. Innerhalb von Beispielen zeigen wir die automatisierte Ableitung der Verhaltensattribute.

Tabelle 1: Glossar der Begrifflichkeiten.

Begriff	Bedeutung
Szenerie	Räumlich stationäre Aspekte der Fahrzeugumgebung [16,17]
Verhaltensraum	Abgegrenzte Menge gesetzlich möglicher Verhaltensweisen
Verhaltensattribute	Dimensionen des Verhaltensraumes zur Beschreibung der Verhaltensregeln
Atomarer Verhaltensraum	Straßensegment, innerhalb dessen sich die Verhaltensattribute nicht ändern
Indikationselemente	Elemente der Szenerie, die eine Regel anzeigen/vorgeben

## 2 Stand der Forschung

Verwandte Arbeiten zeigen, dass Ontologien [7,8,9,10] ein häufig verwendeter Ansatz zur Modellierung von Szenarien mit ihren zugehörigen Elementen sind. Ontologien werden bislang aber unseres Wissens nach nicht für die Modellierung von Verhaltensregeln verwendet. Eine weitere Form, die Szenerie zu beschreiben, ist die Nutzung von hochgenauen Kartenformaten [11,12]. Diese Karten sind im Hinblick auf das geforderte Verhalten nur wenig abstrahiert und stellen meist die Elemente der Verkehrsumgebung detailliert nach. Dies führt zu großen Datenmengen mit geringem Informationsgehalt bezüglich der automatisierten Fahraufgabe. Lanelet2 [12] zeigt allerdings vielversprechende Ansätze, da die Szenerie u.a. auf regulatorische Elemente abstrahiert wird. Diese regulatorischen Elemente bieten die Möglichkeit, Verkehrsregeln zu hinterlegen. Jedoch wird die explizite Verhaltensanforderung nicht angegeben. Beispielsweise verweist das Regelement „*Lichtsignalanlage*“ nur auf die jeweilige Lichtsignalanlage (LSA) und die korrespondierende Haltelinie. Es sagt nicht explizit aus, dass es nicht erlaubt ist, bei einer Rotphase über die Haltelinie zu fahren. Butz et al. [13] stellen einen Ansatz zur Abstraktion von Szenarien und Situationen hinsichtlich erforderlichem Systemverhalten vor. Die vorgestellten *zone graphs* sind spezifisch für einzelne Szenarien und somit nicht universell anwendbar. Zudem wird nicht nur das rein gesetzlich vorgegebene Verhalten beschrieben, sondern auch daraus resultierende Fähigkeiten und Verhaltensweisen abgeleitet. Auch die Regeln zur Ableitung der *zone graphs* bleiben offen.

Die Ableitung von Verhaltensanforderungen für HAF in der Literatur basiert auf formalisierten Verkehrsregeln [14,15], Regeln des gesunden Menschenverstands [16] oder Sicherheitsanalysen [17]. Zusätzlich kann Expertenwissen genutzt werden, um die resultierenden Verhaltenssätze zu ergänzen. Neben der Anforderungserstellung werden Verhaltenssätze einschließlich Verkehrsregeln auch zur Überprüfung der Sicherheit von Trajektorien, die von Verhaltensplanern generiert werden, verwendet [18]. In Vorarbeiten [4] wurde ein Ansatz beschrieben, der Informationen über die Verhaltensregeln aus der Szenerie extrahiert, indem sie in Form von Verhaltensattributen als Dimensionen des Verhaltensraumes beschrieben werden. Dieser Ansatz wird als Grundaufbau für diese Veröffentlichung verwendet und daher im nächsten Abschnitt dargestellt.

## 3 Verhaltensattribute

Für das weitere Verständnis werden in diesem Abschnitt die einzelnen Verhaltensattribute, die einen atomaren Verhaltensraum aufspannen, kurz erläutert. In einer parallelen Arbeit entwickeln wir eine gesamtheitliche Beschreibung, die auch die Verknüpfungen zwischen den einzelnen atomaren Verhaltensräumen abbildet (Nachbarn, Vorgänger/Nachfolger). Diese Verknüpfungen sind notwendig, um zu identifizieren, welche Verhaltensbeschränkungen beim Eintritt in die Segmente entlang der geplanten Route vorliegen, um entsprechend das Verhalten rechtzeitig anzupassen. Beispielsweise muss die Fahrzeuggeschwindigkeit schon bei Erreichen eines Geschwindigkeitslimits herabgesenkt sein.

### **Geschwindigkeitslimit**

Dieses Attribut definiert die *zulässige Höchstgeschwindigkeit* innerhalb des atomaren Verhaltensraums. Ein Fahrzeug, das sich in diesem Raum bewegt, darf nicht schneller als diese Geschwindigkeit fahren. Zusätzlich zur Geschwindigkeitsbegrenzung selbst kann es eine *zeitliche Einschränkung* und *andere Bedingungen* geben, die für die Gültigkeit des Limits vorliegen müssen.

### **Begrenzungen**

Dieses Attribut beschreibt die zugehörigen Verhaltensregeln für das Überschreiten der Grenzen eines atomaren Verhaltensraums. Das Überschreiten von Grenzen kann *erlaubt*, *bedingt erlaubt*, *verboten* oder *nicht möglich* sein. Es wird zwischen Längs- und Querbegrenzungen unterschieden.

### **Reservierung**

Die Reservierung legt die Bedingungen fest, die erfüllt sein müssen, um einen Raum aus Vorrang Sicht zu betreten und/oder darin zu bleiben. Jeder atomare Verhaltensraum ist für eine bestimmte (oder mehrere) *Klasse(n) von Verkehrsteilnehmern* reserviert. Diese Klasse von Verkehrsteilnehmern darf innerhalb dieses Raumes nicht durch andere Verkehrsteilnehmer behindert werden. Die *Reservierungsart* definiert in Bezug auf die Fahrtrichtung, für welche Verkehrsteilnehmerklasse der zugehörige Szenerieabschnitt reserviert ist. Eine Reservierungsart kann *eigenreserviert* (für die betrachtete Verkehrsteilnehmerklasse), *fremdreserviert* (für andere Verkehrsteilnehmerklassen) oder *gleichreserviert* (wenn es keine eindeutige Vorrangregel gibt) sein. Ist die Reservierung nicht vom Typ *eigen-reserviert*, kennzeichnet ein *Link* die Bereiche, aus denen die reservierungsberechtigten Verkehrsteilnehmer kommen können.

### **Überholen**

Dieses Attribut definiert die Erlaubnis, andere Verkehrsteilnehmer zu überholen. Ein Überholvorgang findet statt, wenn zwei Verkehrsteilnehmer auf derselben Fahrbahn mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in dieselbe Richtung fahren und das schnellere Fahrzeug das langsamere Fahrzeug überholt. Dabei spielt es keine Rolle, ob sich die beiden Fahrzeuge im gleichen Fahrstreifen befinden oder nicht. Das Überholen kann *verboten* oder *erlaubt* sein.

## **4 Vorgehen zur Ableitung der Verhaltensattribute**

In Abschnitt 1 haben wir das Ziel einer *Verhaltenskarte* eines Streckennetzes in Form der Verhaltenssemantischen Szeneriebeschreibung motiviert. Diese Verhaltenskarte dient sowohl zur Charakterisierung und Spezifizierung der ODD als auch zur Nutzung als Vorgabe der Verhaltensgrenzen im Fahrzeug. Hochgenaue Karten [11][12] liefern ein detailliertes Abbild der Szenerie. Sie enthalten sowohl die Straßengeometrie, Markierungen, Verkehrszeichen als auch sonstige Infrastruktur eines Verkehrsbereichs. Sie stellen somit die Quelle der notwendigen Information zur Ableitung der Verhaltensattribute dar. Zur Ableitung der Verhaltensattribute muss ein Streckennetz, das in Form einer hochgenauen Karte vorliegt, zunächst in Abschnitte entsprechend der *atomaren Verhaltensräume* unterteilt werden. Die

atomaren Verhaltensräume werden durch die vier Attribute *Geschwindigkeitslimit*, *Begrenzung*, *Reservierung* und *Überholen* aufgespannt. Die atomaren Verhaltensräume sind dementsprechend einzelnen Szenerieabschnitten zugewiesen, die wiederum *Indikationselemente* enthalten, welche die im Abschnitt gültigen Regeln instanziiieren und vorgeben. Abb. 1 fasst diesen Rahmen für die Ableitung der Verhaltensattribute in Form eines Entity-Relationship-Modells zusammen.

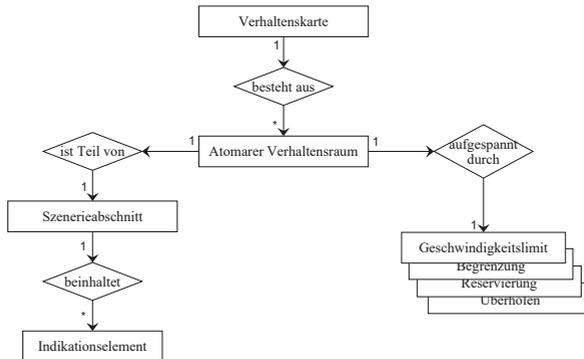


Abbildung 1: Entity-Relationship-Modell Verhaltenskarte und atomarer Verhaltensraum.

Innerhalb der atomaren Verhaltensräume werden die Verhaltensattribute aus den vorhandenen Indikationselementen abgeleitet. In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Bestimmung der Verhaltensattribute innerhalb eines atomaren Verhaltensraumes vorgestellt. Dies bildet die Grundlage zur Implementierung einer automatisierten Ableitung von Verhaltensattributen auf Basis von Kartendaten. Abb. 2 zeigt die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Entitäten, die zur Bestimmung der Verhaltensattribute führen.

Die Grundlage für die Ableitung der Verhaltensattribute bilden die *Indikationselemente*, die innerhalb des betrachteten *Szenerieabschnitts* liegen. Innerhalb eines Abschnitts kann eine beliebige Anzahl an Indikationselementen vorhanden sein. Mit ihnen sind direkt *Verhaltenswirkungen* verbunden. Eine Verhaltenswirkung beschreibt die von dem Indikationselement ausgehende Verhaltenseinschränkung auf das Fahrzeug. Somit bedient eine Verhaltenswirkung eines der Verhaltensattribute. Ein Stoppschild hat beispielsweise die Verhaltenswirkung, dass an der korrespondierenden Haltelinie gehalten werden muss, bevor in den Abschnitt eingefahren werden darf und bedient damit das Begrenzungsattribut. Dabei kann ein Indikationselement mehrere Verhaltenswirkungen hervorrufen. Im Rahmen der Analyse der *Straßenverkehrsordnung* wurden alle Verkehrszeichen auf entsprechende Auswirkungen geprüft und die entsprechende Verhaltenswirkung mit ihnen verknüpft. Neben den

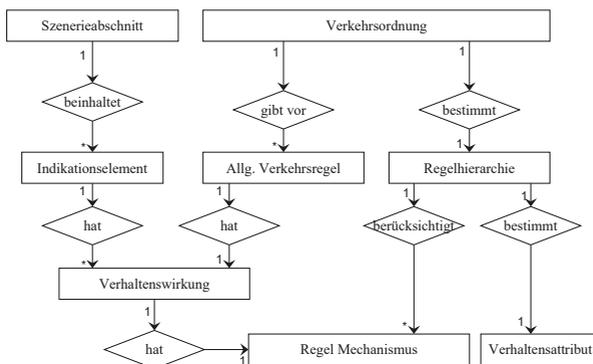


Abbildung 2: Entity-Relationship-Modell zur Bestimmung der Verhaltensattribute.

durch Indikationselemente hervorgerufenen Verhaltenswirkungen, können Verhaltenswirkungen auch durch *allgemeingültige Verkehrsregeln* hervorgerufen werden. Dies sind Verkehrsregeln, die auch ohne ein vorhandenes Indikationselement gültig sind. Beispielsweise gilt in Deutschland an Kreuzungen ohne weitere Verkehrszeichen die „Rechts-vor-Links“-Regel. Diese Regeln wurden ebenfalls aus der Straßenverkehrsordnung extrahiert und mit ihrer Verhaltenswirkung verbunden.

Nun liegen die Verhaltenswirkungen einzelner Indikationselemente sowie der allgemeinen Verkehrsregeln innerhalb des Abschnitts des atomaren Verhaltensraumes vor. Diese konkurrieren jedoch untereinander, da wie zuvor beschrieben, zum Beispiel einzelne Indikationselemente dafür sorgen können, dass Verkehrsregeln, die ohne Verkehrszeichen gültig sind, überschrieben werden. Ein Verkehrszeichen „Vorfahrtsstraße“ überschreibt beispielsweise die Regel „Rechts-vor-Links“. Dies macht eine *Hierarchie* für die gefundenen Verhaltenswirkungen notwendig. Mit dieser Hierarchie wird bestimmt, welche der konkurrierenden Auswirkungen gültig ist und daraus die entsprechenden *Verhaltensattribute* bestimmt, die den Verhaltensraum aufspannen.

Hierfür wird zunächst darauf eingegangen, nach welchen Mechanismen Regeln im deutschen Straßenverkehr hervorgerufen werden. Poggenhans [19] identifiziert hierfür vier unterschiedliche Mechanismen, die abgewandelt für diese Veröffentlichung übernommen werden. Die *Zonen-Regelung* definiert Zonen, innerhalb der bestimmte Verkehrsregeln gelten. Die Zonen sind so lange gültig, bis sie durch ein zugehöriges Verkehrszeichen aufgehoben werden. An *Straßen oder Strecken gebundene Verkehrsregeln* enden sobald diese verlassen wird oder sie durch ein entsprechendes Zeichen aufgehoben werden. Die von Poggenhans identifizierten Mechanismen „Ampeln“ und „Vorfahrtregelungen“ werden im Mechanismus *Lokale Regeln* zusammengefasst. Diese Regeln wirken auf einen lokal beschränkten Bereich. Im Gegensatz zu Poggenhans beschränken sich in dieser Betrachtung die lokalen Regeln nicht nur auf Lichtsignalanlagen, da auch andere Verkehrszeichen eine lokale Verhaltensauswirkung haben können (z.B. zwingt ein Stoppschild zum Halten an der Haltelinie). Da einige Vorfahrtregelungen ebenfalls in einem lokal beschränkten Bereich

gültig sind, werden sie ebenfalls mit in diesen Mechanismus aufgenommen. Des Weiteren werden auch Vorrangregelungen aufgenommen und somit nicht nur Konfliktsituationen mit anderen Fahrzeugen betrachtet, sondern ebenfalls mit Fußgängern und anderen Verkehrsteilnehmern. Bei gleichzeitigem Vorhandensein von verschiedenen Verhaltenswirkungen, die das gleiche Verhaltensattribut bedienen, gilt als erstes die lokale Regelung, dann die an Strecken gebundene Regelung, dann die Zonenregelung und zuletzt die allgemeinen Verkehrsregelungen. Innerhalb der lokalen Regelungen ergibt sich nochmal eine untergeordnete Hierarchie. Hierbei gilt, dass die Regelungen durch Weisungen von Polizeibeamten vor Lichtzeichen und Lichtzeichen vor Verkehrszeichen gelten.

An Verzweigungen (bspw. Kreuzungen) ist aufgrund der Überlappung verschiedener Fahrstreifen eine weitere Logik notwendig, um auf die in dem Reservierungsattribut abgelegten Vorrangregeln zu schließen. An Kreuzungen ohne Lichtsignalanlagen besteht die Möglichkeit der „Rechts-vor-Links“-Regel auf Basis der allgemeinen Verkehrsregeln oder es wird durch Indikationselemente eine bevorrechtigte Straße vorgegeben (dies beinhaltet abknickende Vorfahrtstraßen). Exemplarisch ist in Abb. 3 eine fünf-armige Kreuzung für beide Fälle dargestellt.

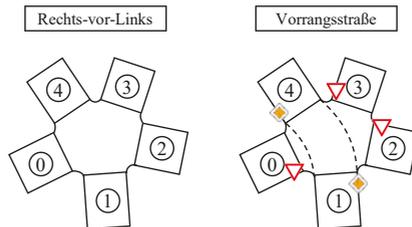


Abbildung 3: Exemplarische Kreuzungen zur Vorrangableitung.

Zur Ableitung der Vorrangregeln werden die Kreuzungsarme auf Basis ihrer Ausrichtung gegen den Uhrzeigersinn nummeriert, um die topologische Anordnung abzubilden. Die Nummerierung kann an einem beliebigen Arm beginnen. Eine weitere geometrische Bestimmung ist nicht notwendig. Zusätzlich werden alle möglichen Verbindungen in Form von richtungsabhängigen Tupeln hinterlegt. Eine Verbindung von 1 nach 4 wird durch das Tupel (1,4) beschrieben. Grundsätzlich muss nur den Verbindungen mit geometrischer Überlappung potenziell Vorrang gewährt werden. An einer „Rechts-vor-Links“-Kreuzung muss allen Eingängen, die innerhalb dieses Tupels liegen, Vorrang gewährt werden. Für die Verbindung (1,4) sind das beispielsweise die Eingänge 2 und 3. An der Kreuzung mit Vorrangstraße muss zwischen drei Fällen unterschieden werden.

1. Entlang der Vorrangstraße muss keinem anderen Eingang Vorrang gewährt werden ((1,4) und (4,1))
2. Bei Einfahrt über eine bevorrechtigte Straße, jedoch Ausfahrt in eine nachrangige Straße, muss bevorrechtigten Eingängen innerhalb des Tupels Vorrang gewährt werden. Beispielsweise muss die Verbindung (1,0) dem Eingang 4 Vorrang gewähren
3. Bei Einfahrt über und Ausfahrt in eine nachrangige Straße muss den Eingängen der Vorrangstraße sowie Eingängen innerhalb des Tupels Vorrang gewährt werden. Beispielsweise muss die Verbindung (2,0) den Eingängen 1, 3 und 4 Vorrang gewähren.

## 5 Implementierung und Anwendungsbeispiel

In diesem Abschnitt wird die Implementierung des zuvor beschriebenen Vorgehens zur Ableitung der Verhaltensattribute anhand von einer Beispielszene dargestellt. Hierfür wurde eine OpenDRIVE Karte erstellt, die als Basis für die Ableitung der Attribute genutzt wird. Bisher ist die Umsetzung auf einstreifige Straßen je Fahrtrichtung beschränkt. In dem betrachteten Beispiel wird eine abknickende Vorfahrt betrachtet. Zudem werden Zonenregelungen über Ortseingangsschilder sowie Streckenregelungen über Geschwindigkeitsbegrenzungszeichen eingeführt. Eine Übersicht über die Beispielszene findet sich in Abb. 4.

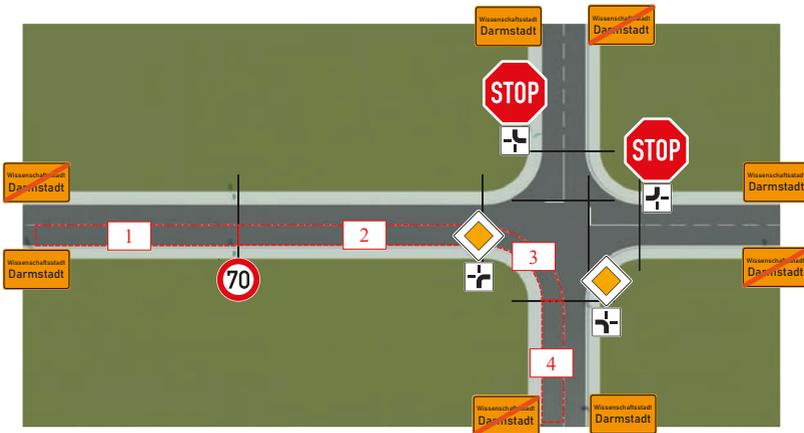


Abbildung 4: Beispielszene zur Anwendung der Ableitung von Verhaltensattributen.  
Eigene Darstellung basierend auf Visualisierung der OpenDRIVE Karte mit MathWorks® RoadRunner

Die Implementierung gliedert sich in die in Abb. 5 gezeigten Schritte. Das Einlesen der Karte zur Nutzung mit Python erfolgt mit Hilfe des OpenDRIVE Parser aus dem Common-Road Scenario Designer der TUM [21]. Nachfolgend werden die weiteren Schritte der Implementierung erläutert.

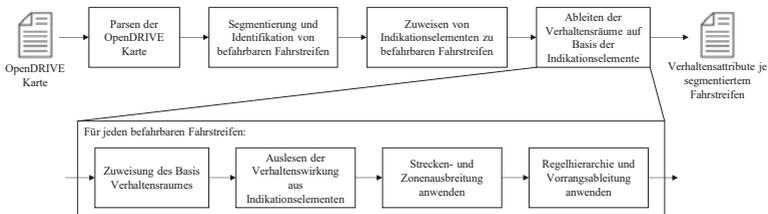


Abbildung 5: Implementierung des Vorgehens zur Ableitung der Verhaltensattribute.

### **Segmentierung und Identifikation von befahrbaren Fahrstreifen**

Als erstes werden auf Basis des Fahrstreifentyps aus OpenDRIVE befahrbare Fahrstreifen identifiziert. Bereiche außerhalb des regulären Bewegungsbereiches erhalten keine Verhaltensraumbeschreibung, da ein Fahrzeug sich dort nicht aufhalten soll. Die Attribute könnten jedoch hier genauso verwendet werden. Wie in Abschnitt 3 erläutert, werden die Verhaltensattributen in Form von atomaren Verhaltensräumen einzelnen Szenerieabschnitten zugewiesen. Dies bedeutet, dass die befahrbaren Fahrstreifen in einzelne Segmente unterteilt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Tools, das bei jedem Element, das eine Verhaltensschränkung hervorruft, eine Segmentierung vornimmt. Bei einer Analyse des Verkehrsraums wurden folgende Elemente identifiziert:

- Straßentopologie (Anzahl und Anordnung der Fahrstreifen)
- Kreuzungen und Verzweigungen (als Auslöser für Vorrangregeln)
- Fahrbahn/-streifenbegrenzungen (Fahrstreifenmarkierung, Bordstein, ...)
- Verkehrszeichen (inkl. Fahrbahnmarkierungen)
- Statische undurchfahrbare Objekte (Leitplanke, Schranke, ...)

Hierbei besteht die Möglichkeit, dass aufgrund aufeinanderfolgender Elemente mit gleicher Verhaltenswirkung eine Segmentierung vorgenommen wird, die in identischen aufeinanderfolgenden Verhaltensräumen resultiert. In zukünftigen Arbeiten wird eine Logik implementiert, die diese Segmente wieder zusammenfügt, somit ist die genaue Kenntnis der Segmentierung vor dem Ableiten der Verhaltensattribute nicht notwendig. Bei Bedarf kann aktuell eine manuelle Korrektur dieser Segmentierung erfolgen. Bei der Segmentierung ist der Top Down Aufbau des OpenDRIVE Formats ein Vorteil, da die Zuweisung und Verbindung von Straßen bereits vorhanden und hinterlegt sind. Es ergibt sich die in Abb. 3 durch schwarze Querstriche gezeigte Segmentierung.

An Verzweigungen bspw. Kreuzungen wird grundsätzlich auf Basis der verschiedenen möglichen Pfade segmentiert (hier: links abbiegen, rechts abbiegen, kreuzen). Zusätzlich gibt es im vorliegenden Beispiel eine Segmentierung auf Basis der Haltelinie, da hierdurch das longitudinale Begrenzungsattribut beeinflusst wird. Ansonsten erfolgen Segmentierungen auf Basis sich ändernder Geschwindigkeitsvorgaben.

### **Zuweisen von Indikationselementen**

Im nächsten Schritt werden die Indikationselemente den einzelnen Fahrstreifen-Segmenten zugewiesen. Hierfür wird die Ausrichtung der Verkehrszeichen berücksichtigt. Im vorliegenden Beispiel werden die Verkehrszeichen den entsprechenden Segmenten zugewiesen. Die Hinterlegung von Indikationselementen in der Top Down Struktur von OpenDRIVE stellt hierbei eine Herausforderung dar. Zum Beispiel werden Fahrbahnmarkierung in einer anderen Form und an anderer Stelle abgelegt als Bordsteine, obwohl beides Begrenzungen eines Fahrstreifens darstellen. Bei der Implementierung muss also auf korrekte Zuweisung der Elemente besonders geachtet werden.

### **Ableiten der Verhaltensräume**

Als erstes bekommt jedes Fahrstreifensegment einen Basis-Verhaltensraum zugewiesen. Dieser Verhaltensraum deckt die allgemeinen Verkehrsregeln (ohne jegliche Indikationselemente) ab. Anschließend werden die Verhaltenswirkungen inklusive Regelmechanismus

aus der erstellten Datenbank der Indikationselemente ausgelesen. Da die Indikationselemente von Zonen-Regelungen und an Strecken gebundenen Regelungen nicht zwangsweise in jedem Segment wiederholt werden, ergibt sich die Notwendigkeit, Informationen über die Verhaltenswirkungen und deren Gültigkeitsmechanismus von vorherigen Verhaltensräumen zu kennen. Hierfür wird die Strecken- und Zonenausbreitung auf Basis der Indikationselemente im Streckennetz durchgeführt.

Abschließend werden auf Basis der Regelhierarchie die Verhaltensattribute bestimmt und ausgegeben. Hier werden aus Platzgründen beispielhaft die rot hervorgehobenen Fahrstreifen-segmente (1, 2, 3 und 4) betrachtet. Für die Zonenausbreitung wird jedem Segment, das ein zonenauslösendes Indikationselement (hier: Ortseingangsschild) beinhaltet, die entsprechende Verhaltenswirkung und Richtung der Zone zugewiesen. Nun werden auf Basis der OpenDRIVE-Informationen die Nachfolger durchlaufen bis ein zonenbeendendes Zeichen (hier: Ortsausgangsschild) erreicht wird. Alle durchlaufenden Segmente erhalten die Verhaltenswirkung der Zone (Geschwindigkeitslimit 50 km/h). Da Fahrstreifen-segment 1 noch vor der Streckenbegrenzung liegt, erhält es das Geschwindigkeitsattribut 50 km/h. Analog werden für die streckenbezogenen Regeln (hier: Geschwindigkeitslimit 70 km/h) die startenden Indikationselemente identifiziert. Der Unterschied ist nun, dass an Kreuzungen nicht in alle nachfolgenden Richtungen die Fahrstreifen durchlaufen werden, sondern nur entlang der Routenregelung. An der abknickenden Vorfahrt wird dementsprechend nach rechts abknickend (Fahrstreifen-segment 2) fortgesetzt, bis das streckenbeendende Ortsausgangsschild erreicht wird. Dementsprechend erhalten Fahrstreifen-segment 2, 3 und 4 das Geschwindigkeitsattribut 70 km/h, da die Streckenregelung einen höheren Regelrang als die Zonenregelung hat. Abschließend überschreibt die Vorrangregelung durch die abknickende Vorfahrt die Vorrangregelung des Basis-Verhaltensraumes. Hierbei wird die in Abschnitt 4 beschriebene Logik angewendet. Durch die abknickende Vorfahrt resultiert ein eigenreservierter Bereich in Fahrstreifen-segment 3. Nachfolgend sind in Tab. 2 die resultierenden Verhaltensräume aus der automatisierten Ableitung der vier Fahrstreifen-segmente aufgelistet:

Tabelle 2: Resultierende Verhaltensattribute für die vier Fahrstreifen-segmente.

Attribut	Fahrstreifen-Segment 1	Fahrstreifen-Segment 2	Fahrstreifen-Segment 3	Fahrstreifen-Segment 4
Geschwindigkeitslimit	Max: 50 km/h	Max: 70 km/h	Max: 70 km/h	Max: 70 km/h
Begrenzung	Long: allowed Links: allowed Rechts: verboten			
Reservierung	Typ: eigenreserviert	Typ: eigenreserviert	Typ: eigenreserviert	Typ: eigenreserviert
Überholen	Erlaubnis: ja	Erlaubnis: ja	Erlaubnis: ja	Erlaubnis: ja

## 6 Fazit und Ausblick

In dieser Veröffentlichung werden die Regeln zur Ableitung von Verhaltensattributen vorgestellt und angewendet. Dies ermöglicht, den atomaren Verhaltensraum der Szenerie automatisiert auf Basis der vorhandenen Indikationselemente zu bestimmen. Innerhalb von einem Anwendungsbeispiel wird die praktische Umsetzung des Ansatzes gezeigt. In Zukunft wollen wir die Anwendung auf mehrstreifige Straßenlayouts erweitern. Die automatisierte Ableitung von Verhaltensattributen bildet die Grundlage für die Anwendung der BSSD auf gesamte Streckennetze. Hierfür wurde die Anforderung identifiziert, die Zusammenhänge zwischen verschiedenen atomaren Verhaltensräumen erfassen und darstellen zu können. Derzeit arbeiten wir an einer Methode zur Beschreibung ganzer Verkehrsnetze. Diese Beschreibung ist in der Lage, die identifizierte Anforderung zu erfüllen und somit eine vollständige Repräsentation des Verhaltensraums für ein ganzes Verkehrsgebiet zu schaffen. In Zukunft planen wir mit Hilfe einer Formalisierung der Verhaltensattribute die Verkehrsregelkonformität unabhängig vom Einsatzgebiet zu spezifizieren und somit Testkriterien für das Verhalten von HAF abzuleiten. Diese Kriterien werden innerhalb einer Testsuite zur Prüfung der Verkehrsregelkonformität abgetestet, um die Fähigkeit eines HAF Verkehrsregeln einzuhalten, zu bewerten. Der Vorteil besteht hierbei in der universellen Anwendbarkeit der Testkriterien, unabhängig von der Ausprägung der Indikationselemente des Einsatzgebietes.

## 7 Danksagung

F. G. dankt Continental für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung im Rahmen von PRORETA 5, einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Universität Bremen, der Technischen Universität Darmstadt, der TU Iasi und Continental zur Erforschung von Zukunftskonzepten für autonome Fahrsysteme.

Wir danken Moritz Berghöfer für die Umsetzung des Tools zur Segmentierung des Streckennetzes als Basis für die implementierten Methoden.

## Literatur

- [1] W. Wachenfeld und H. Winner, "The Release of Autonomous Vehicles", in *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects*, M. Maurer, B. Lenz, H. Winner, and J. C. Gerdes, Eds., s.l.: Springer, 2016, S. 425-449.
- [2] S. Geyer, M. Baltzer, B. Franz, S. Hakuli, M. Kauer, M. Kienle, S. Meier, T. Weißgerber, K. Bengler, R. Bruder, F. Flemisch, H. Winner, "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*, vol. 8, no. 3, pp. 183–189, 2014, doi: 10.1049/iet-its.2012.0188.
- [3] 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, 2015.

- [4] 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, pp. 667-672, doi: 10.1109/ITSC48978.2021.9564892.
- [5] Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, J3016, SAE International (SAE), 2021.
- [6] M. Lippert und H. Winner, "How to Derive Behavioral Requirements for Automated Driving from a Behavior-Semantic Scenery Description", in *Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*. Bd. 14. Berkheim: Uni-DAS e.V., 2022.
- [7] G. Bagschik, T. Menzel, und M. Maurer, "Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles", in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Changshu, 2018, pp. 1813-1820.
- [8] S. Ulbrich, T. Nothdurft, M. Maurer, und P. Hecker, "Graph-based context representation, environment modeling and information aggregation for automated driving," in *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2014 IEEE*, MI, USA, 2014, pp. 541-547.
- [9] M. Buechel, G. Hinz, F. Ruehl, H. Schroth, C. Gyoeri, und A. Knoll, "Ontology-based traffic scene modeling, traffic regulations dependent situational awareness and decision-making for automated vehicles", in *28th IEEE Intelligent Vehicles Symposium: June 11-14, 2017*, Redondo Beach, California, USA, Los Angeles, CA, USA, 2017, pp. 1471-1476.
- [10] R. Regele, "Using Ontology-Based Traffic Models for More Efficient Decision Making of Autonomous Vehicles", in *Fourth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems*, 2008, Gosier, Guadeloupe, 2008, S. 94-99.
- [11] ASAM OpenDRIVE: Offene dynamische Straßeninformationen für die Fahrzeugumgebung: ASAM, 2020. Accessed: Nov. 6 2020. [Online]. Verfügbar: <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/>.
- [12] F. Poggenhans, J.-H. Pauls, J. Janosovits, S. Orf, M. Naumann, F. Kuhnt, M. Mayr, "Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving", in *2018 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Maui, HI, 2018, pp. 1672-1679.
- [13] M. Butz, C. Heinzemann, M. Herrmann, J. Oehlerking, M. Rittel, N. Schalm, D. Ziegenbein, "SOCA: Domain Analysis for Highly Automated Driving Systems," 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294438.
- [14] K. Esterle, L. Gressenbuch, und A. Knoll, "Formalizing Traffic Rules for Machine Interpretability", in *2020 IEEE 3rd Connected and Automated Vehicles Symposium (CAVS)*, Victoria, BC, Canada, Nov. 2020 - Dec. 2020, pp. 1-7.
- [15] 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*, pp. 752-759.
- [16] S. Shalev-Shwartz, S. Shammah, und A. Shashua, "On a Formal Model of Safe and Scalable Self-driving Cars," Aug. 2017. [Online]. Verfügbar: <http://arxiv.org/pdf/1708.06374v6>.

- [17] T. Stolte, G. Bagschik, A. Reschka und M. Maurer, "Hazard analysis and risk assessment for an automated unmanned protective vehicle", in *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2017, pp. 1848-1855, doi: 10.1109/IVS.2017.7995974.
- [18] C. Pek, S. Manzinger, M. Koschi, und M. Althoff, "Using online verification to prevent autonomous vehicles from causing accidents", in *Nat Mach Intell*, vol. 2, no. 9, pp. 518-528, 2020, doi: 10.1038/s42256-020-0225-y.
- [19] F. Poggenhans, "Generierung hochdetaillierter Karten für das automatisierte Fahren", Dissertation, KIT Karlsruhe Institut für Technologie, Institut für Mess- und Regelungstechnik, 2019.
- [20] S. Maierhofer, M. Klischat and M. Althoff, "CommonRoad Scenario Designer: An Open-Source Toolbox for Map Conversion and Scenario Creation for Autonomous Vehicles," in *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2021, pp. 3176-3182, doi: 10.1109/ITSC48978.2021.9564885

