

Anforderungen aus Realverkehrsdaten: Szenarienbasierte Spezifikationsableitung für ADAS

From real-world traffic data to requirements: scenario-based derivation of specifications for ADAS

Florian Schröder, M. Sc., Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach;
Christian Kotulla, M. Sc., fka GmbH, Aachen;
Steffen Runde, B. Sc., fka GmbH, Aachen;
Dr.-Ing. **Michael Grimm**, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach;
Dipl.-Ing. **Christoph Klas**, fka GmbH, Aachen;
Prof. Dr.-Ing. **Adrian Zlocki**, fka GmbH, Aachen

Kurzfassung

Zur Auslegung der Verhaltensentscheidungen einer automatisierten Fahrfunktion sind geeignete Spezifikationen essenziell. Neben Sicherheitsaspekten stehen dabei Wechselwirkungen mit relevanten Umgebungsfahrzeugen sowie kooperatives Fahrverhalten und die Nutzerakzeptanz der Funktion im Vordergrund. Wir präsentieren eine Methode, um effizient, strukturiert und datenbasiert Anforderungen aus Realverkehrsdaten abzuleiten und daraus Spezifikationen für diese Aspekte der Fahrfunktion zu formulieren. Umgekehrt ermöglicht die Methode die systematische Untersuchung und datenbasierte Validierung bestehender Anforderungen. Beide Varianten der Methode werden unter Nutzung von Realverkehrsdaten angewendet und ausgewertet, um deren Effektivität, Nutzbarkeit und Flexibilität aufzuzeigen.

Abstract

Suitable specifications are important for designing behavioral decisions of automated driving functions. Key aspects include interactions with surrounding vehicles as well as cooperative driving behavior and user acceptance. We propose a method to formulate requirements for these aspects of a driving function from real-world trajectory data in an efficient, structured and data-driven way and to derive a specification afterwards. Conversely, a systematic analysis and data-based validation of an existing requirement can be performed. The two different approaches of the proposed method are applied and evaluated using real-world data to demonstrate its effectiveness, usability and flexibility.

1. Einleitung

Mit steigender Stufe der Automatisierung erhöhen sich auch die Komplexität und die daraus resultierenden Anforderungen an automatisierte bzw. hochautomatisierte Fahrfunktionen.

Dies erfordert die Entwicklung innovativer und zielgerichteter Methoden, um in gleichbleibender oder sogar verkürzter Entwicklungszeit ein hochkomplexes System bis zur Serienreife zu bringen. Bei dieser Herausforderung gilt es, alle erforderlichen Normen und Gesetze zu erfüllen und gleichzeitig eine Funktion zu schaffen, die sowohl hohen Kundennutzen als auch ein gesellschaftlich akzeptiertes, kooperatives Fahrverhalten im realen Mischverkehr bietet. Daher ist es bereits in der frühen Entwicklungsphase essenziell, Anforderungen aus Realverkehrsszenarien abzuleiten.

Der hohe Vernetzungsgrad und die Vielzahl an Sensoren bieten hochautomatisierten Fahrfunktionen einen sehr hohen Informationsgehalt. Dies ermöglicht den Systemen, nicht nur den Eigennutzen einer Fahrentscheidung zu betrachten, sondern auch den Gesamtnutzen aller betroffenen Verkehrsteilnehmer. Daher besteht das Potenzial, durch kooperatives Fahrverhalten von hochautomatisierten Fahrfunktionen einen Beitrag zur Senkung von Gesamtverkehrskosten (unter anderem Streckenauslastung, Verkehrsfluss, Energieeffizienz, Zeit etc.) zu leisten [1].

Um ein solches Verhalten zu analysieren und zu spezifizieren, werden neben dem wissenschaftlichen Grundlagenwissen zu kooperativem Verhalten auch hochgenaue und umfassende Informationen von realen Fahrszenarien benötigt. Zur Kooperationsbewertung ist das Verhalten von Verkehrsteilnehmern zueinander zu analysieren. Um die Zusammenhänge und Einflussfaktoren von kooperativem Fahrverhalten im Realverkehr verlässlich zu erkennen, wird eine große Stichprobe von Fahrszenarien benötigt. Die Generierung einer solchen Stichprobe erfordert ein geeignetes und kosteneffizientes Messsystem.

Bei der Aufzeichnung von Fahrszenarien durch ein mit Sensorik ausgestattetes Messfahrzeug kann aufgrund von Verdeckung nicht sichergestellt werden, dass alle im Fahrszenario enthaltenen Verkehrsteilnehmer erfasst werden können. Zudem beeinflusst das Messfahrzeug durch die sichtbare Messtechnik den Realverkehr. Daher werden zur Messung Drohnen mit hochauflösenden Kameras eingesetzt. Diese erzeugen Videoaufnahmen aus der Vogelperspektive. Diese Perspektive ermöglicht es, alle Fahrzeuge im betrachteten Streckenabschnitt mit hoher Genauigkeit zu erfassen. In Flughöhen von über 100 m ist die Drohne außerdem für vorbeifahrende Verkehrsteilnehmer kaum zu erkennen, sodass der Realverkehr nicht beeinflusst wird und naturalistisches Fahrverhalten gegeben ist [2]. Dieses Messverfahren ermöglicht darüber hinaus die kosteneffiziente Aufzeichnung einer Vielzahl von Fahrszenarien und bietet große Flexibilität bei der Variation des Messortes.

Die erforderlichen Verkehrsdaten aus der Vogelperspektive werden durch das leveLXData-Projekt (www.levelxdata.com) der fka GmbH bereitgestellt. Die Datenverarbeitungskette von leveLXData sieht vor, dass in mehreren Schritten Trajektoriendaten automatisiert aus den

Videodaten extrahiert, Fahrszenarien klassifiziert und in einer durchsuchbaren Datenbank gespeichert werden. So ist ein Vergleich von Fahrszenarien mit varierten Einflussparametern (z.B. anderer Ort, Land, Wetterbedingungen etc.) möglich.

Diese Daten bilden die Basis, um Anforderungen für hochautomatisierte Fahrfunktionen aus Realverkehrsdaten abzuleiten sowie deren Kundenfokus und die Ausprägung des kooperativen Fahrverhaltens weiter erhöhen zu können.

Andersherum können durch diese Methode frühzeitig bestehende Anforderungen in realen Fahrszenarien verifiziert und so mögliche Spezifikationslücken oder Abweichungen in einem frühen Stadium korrigiert werden.

2. Stand der Technik

Zunächst werden bestehende Analysen zur Nutzung von Daten in der Entwicklung von ADAS-Funktionen vorgestellt. Außerdem wird der spezifische Einsatz szenarienbasierter Methoden im ADAS-Bereich beschrieben.

2.1 Analyse der Datennutzung

Die Nutzung großer Datenmengen ist in der Entwicklung von ADAS-Funktionen essenziell. Dazu stellen Orlovska et al. in ihrer Studie fest, dass die Nutzung im Entwicklungszeitraum meist auf interne Fahrzeugdaten und subjektives Feedback beschränkt ist. Als Grund dafür wird angeführt, dass Fahrstudien zur Aufzeichnung von naturalistischem Fahrverhalten meist erst nach der Fertigstellung der ADAS-Funktion durchgeführt werden können. Daher sind Orlovska et al. der Ansicht, dass die Aufzeichnung von naturalistischem Fahrverhalten und die Methoden zur Evaluierung von ADAS-Funktionen verbessert werden müssen, um eine objektive Entwicklung dieser Funktionen zu ermöglichen [3].

In [4] werden aus der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) Anforderungen an das Fahrverhalten autonomer Fahrzeuge bezüglich Sicherheit und kooperativen Fahrverhaltens hergeleitet. Davon ausgehend wird ein Konzept für einen ausreichenden Grad der Erfüllung dieser Kriterien durch autonome Fahrzeuge beschrieben. Für die möglichst exakte Quantifizierung der genutzten Parameter (z.B. Fahrzeugabstände und -geschwindigkeiten) sind Realverkehrsdaten notwendig [4].

2.2 Szenarienbasierte Methoden

Nach den Ergebnissen der durchgeführten Literaturrecherche wurden szenarienbasierte Methoden bisher vor allem zur Validierung automatisierter Fahrfunktionen in Bezug auf die Fahrsicherheit eingesetzt. Riedmaier et al. haben dazu in ihrer umfassenden Übersicht zur

Nutzung von Szenarien zur Absicherung von automatisierten Fahrzeugen [5] eine Schematik für die Einordnung verschiedener szenarienbasierter Ansätze vorgestellt. Diese sieht vor, dass Szenarien auf Basis von Realdaten oder Expertenwissen definiert werden und nur eine Auswahl dieser für die Validierung von automatisierten Fahrzeugen in der Simulation genutzt wird. Eine Betrachtung der realen Verkehrsdaten ist dabei nur indirekt vorgesehen.

Eine Anwendung der szenarienbasierten Simulation ist die von Gerwinn et al. vorgestellte stochastische Methode zur Validierung von ADAS-Funktionen. Dabei wird ein gewähltes Szenario wiederholt mit varierten Parametern simuliert, um Konfidenzintervalle für die Leistung der Fahrfunktion zu bestimmen [6]. Dabei wird allerdings auf die Nutzung realer Verkehrsdaten verzichtet.

3. Methode

Es wird zunächst die Extraktion der Szenarien aus Autobahn-Trajektoriendaten dargestellt, welche die Grundlage der vorgestellten Methode bilden. Anschließend werden zwei Varianten der Methode vorgestellt, einerseits zur Ableitung neuer und andererseits zur Validierung bestehender Anforderungen.

3.1 Szenarienextraktion aus Realverkehrsdaten

Reale, hochgenaue Autobahn-Trajektoriendaten wie der exiD-Datensatz [7] bilden die Grundlage der vorgestellten Methode. Diese Daten beinhalten reales menschliches Fahrverhalten von Personen mit unterschiedlicher Fahrerfahrung und Fahrweise. Ebenso drücken sich psychologische Aspekte und Faktoren wie Ungeduld oder Zeitdruck in Form der durch den Fahrer initiierten Fahrzeugbewegung in den Daten aus. Diese Eigenschaften, die Vielzahl der erfassten Verkehrsteilnehmer und die verdeckungsfreie Messmethode aus der Vogelperspektive ergeben ein umfassendes Bild des realen Verkehrsgeschehens und ermöglichen in der Konsequenz die Ableitung realitätsnaher Anforderungen an automatisierte Fahrfunktionen.

Um eine gezielte systematische Untersuchung bestimmter Fahrszenarien zu ermöglichen, muss der Realverkehr zunächst in klar definierbare und abgrenzbare Szenarien strukturiert werden. Dazu enthalten die leveLXData-Autobahndatensätze neben Positionsdaten, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Metainformationen des Verkehrsteilnehmers auch kartenbasierte Informationen. Die Verkehrsteilnehmer werden auf einer zugrundeliegenden Lanelet2-Karte [8] platziert und entsprechende Relationen (z.B. Vorderfahrzeuge) hergeleitet. Auf dieser Basis werden für jeden Verkehrsteilnehmer zu jedem Zeitpunkt relevante Metriken wie „Time to Collision“ oder Sicherheitsabstand bestimmt.

Die Trajektoriendaten und kartenbasierten Informationen bilden die Basis für die sich anschließende Strukturierung des Verkehrsgeschehens. Dazu wird das durch die fka GmbH mitentwickelte Szenarienkonzept für Autobahnen der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) [9] genutzt. Dieses zerlegt jede Trajektorie in eine Abfolge von Fahrzuständen (z.B. Folgefahrt) und -transitionen (z.B. Spurwechsel). Parallel können beliebig viele Interaktionen mit umgebenden Fahrzeugen (z.B. laterale Vorbeifahrt) dargestellt werden, die im Konzept als überlagerte Interaktionen realisiert sind. Durch Kombination dieser drei Klassen von Grundszenarien lassen sich dann komplexere Szenarien bilden. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 1 das komplexe Szenario „Links Überholen“ dargestellt.

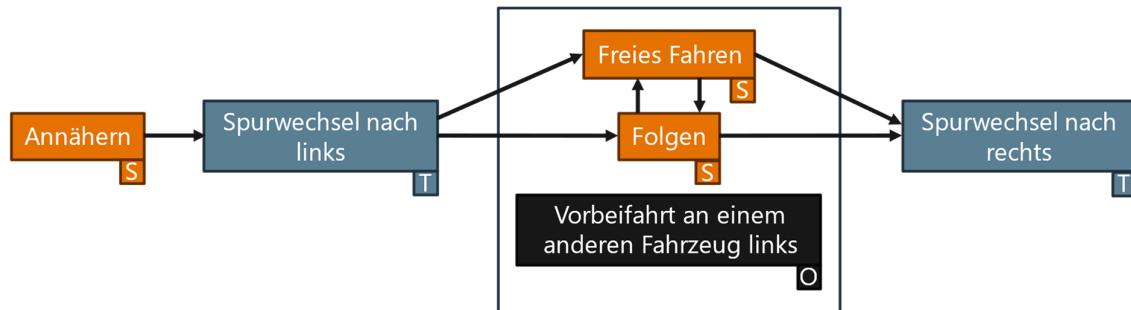


Abbildung 1: Komplexes Szenario „Links überholen“ im Szenarienkonzept der BASt als Abfolge von Grundszenarien. Enthalten sind die drei Klassen von Grundszenarien: Fahrzustände (S), Transitionen (T) und überlagerte Interaktionen (O). Das Szenario setzt sich im Wesentlichen zusammen aus einem Spurwechsel nach links, gefolgt von einer beliebigen Anordnung von freier Fahrt und Folgefahrt, während der das Ego-Fahrzeug ein Fahrzeug links passiert. Abschließend erfolgt ein Spurwechsel nach rechts.

Die Suche nach einem definierten Fahrszenario lässt sich dann realisieren, indem das Fahrszenario als Abfolge von Grundszenarien bzw. als komplexes Szenario dargestellt wird und die Grundszenarien aller Verkehrsteilnehmer nach dieser Abfolge durchsucht werden. Die auf diese Weise extrahierten Szenarien können dann unmittelbar genutzt oder in einer sich anschließenden Filterung nachgeschärft werden. Denkbar ist beispielsweise die nachgeschaltete Filterung auf einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich des Ego-Fahrzeugs oder auf bestimmte Fahrstreifen der Lanelet2-Karte.

3.2 Beschreibung der Methode zur szenarienbasierten Spezifikationsableitung

Die Methode kann in zwei Varianten angewendet werden, welche in Abbildung 2 dargestellt sind. Grundlage sind jeweils Trajektoriendaten, aus denen zunächst Szenarien extrahiert werden. Diese werden im nächsten Schritt hinsichtlich Kooperation annotiert und für die Datenanalyse nutzbar gemacht. In der datenbasierten Variante werden die annotierten

Szenarien zusammen mit den relevanten Kenngrößen, welche sich aus einer physikalischen Modellierung ergeben, in der Datenanalyse zur Spezifikationsableitung genutzt. Die so abgeleitete Spezifikation kann wiederum als Eingabe für den anforderungsbasierten Ansatz genutzt werden. Bei der anforderungsbasierten Variante wird eine bestehende Anforderung mittels eines Parametervergleichs mit Trajektoriendaten bewertet.

Beide Varianten der Methode sind in den folgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben.

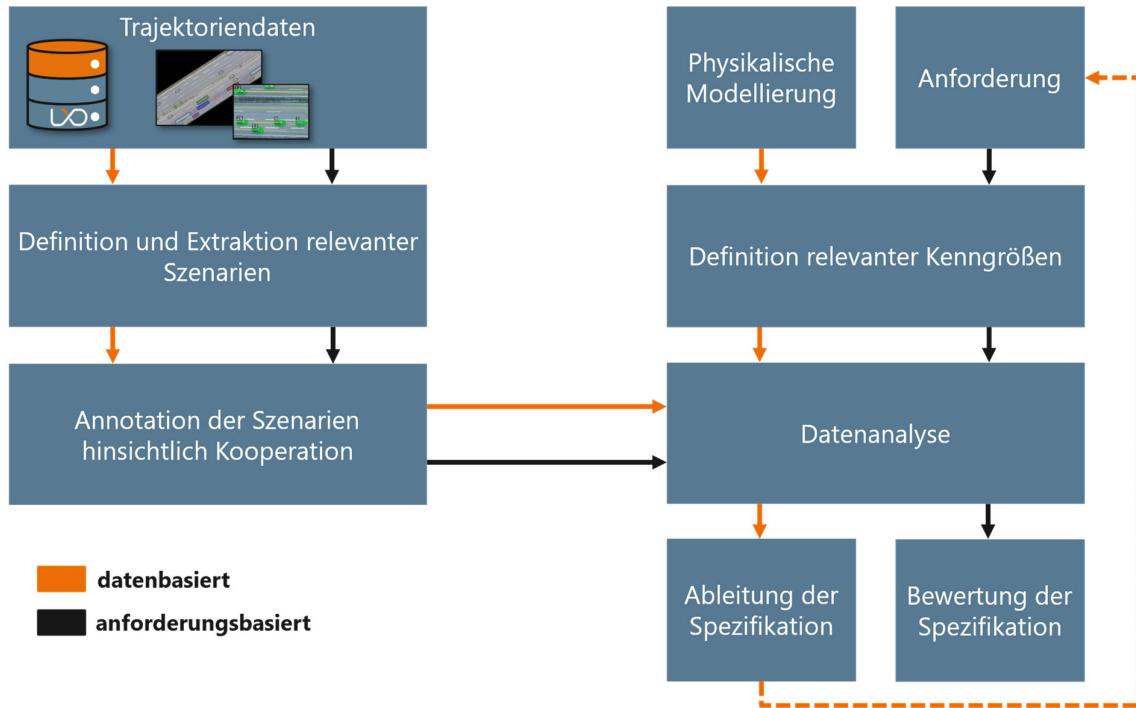


Abbildung 2: Methode zur szenarienbasierten Spezifikationsableitung. Die Methode kann zur Anforderungsableitung aus Daten (datenbasiert) und zur Validierung bestehender Anforderungen (anforderungsbasiert) genutzt werden. (Datenbasiert): Aus einer physikalischen Modellierung werden Kenngrößen extrahiert. Diese können zur Datenanalyse der mit subjektiver Bewertung angereicherten Realverkehrsdaten genutzt werden, um Anforderungen abzuleiten. (Anforderungsbasiert): Eine bestehende Anforderung wird anhand eines definierten Szenarios durch einen Parametervergleich mit Trajektoriendaten bewertet.

3.2.1 Anforderungsableitung aus Daten (datenbasiert)

Die allgemeine Definition von Kooperation nach [10] kann wie folgt auf ein Fahrszenario übertragen werden. Kooperation besteht, wenn das Fahrverhalten von zwei oder mehreren Fahrzeugen den Gesamtnutzen im Vergleich zu einem Referenzszenario steigert, was sich in geringeren Gesamtkosten äußert.

Folglich liegt der Ansatz nahe, die Gesamtkosten mathematisch durch eine Kostenfunktion zu modellieren. Nach [11] setzt sich diese aus der Summe der Kostenterme Sicherheit, Energieeffizienz, Zeiteffizienz und Komfort zusammen.

Für eine Kooperationsentscheidung, die auf einer Kostenfunktion basiert, müssen bei der Modellierung der Kostenterme Annahmen über unbekannte fahrzeugspezifische Größen wie maximale Bremsverzögerung, Fahrzeugmasse etc. getroffen werden. Diese Informationen stehen üblicherweise im Realverkehr und bei späteren Fahrfunktionen nicht zur Verfügung.

Zur Verallgemeinerung des Ansatzes wurden die einzelnen Kostenterme auf praxisnahe Größen, die durch die Fahrzeugsensorik erfasst werden können, zurückgeführt. Dies ermöglicht es, eine Kooperationsentscheidung über definierte Schwellwerte der gewählten Metriken zu festgelegten Zeitpunkten zu treffen. Ein weiterer Vorteil dieser Herangehensweise besteht darin, dass eine Überführung in formulierbare Anforderungen möglich ist.

Sowohl für die Kooperationsbewertung mittels Kostenfunktion als auch über Schwellwerte wird zur Parametrisierung eine subjektive Bewertung des Fahrszenarios benötigt. Daher müssen geeignete Verfahren, wie beispielsweise Probandenbewertungen, eingesetzt werden, um die Daten mit einer subjektiven Kooperationsbewertung anzureichern.

Diese Daten, einschließlich der Kooperationsbewertung, bilden die Grundlage für weitere Analysen. Durch die im ersten Schritt extrahierten physikalischen Kenngrößen werden nun Zusammenhänge zur Kooperationsbewertung untersucht. Dies kann beispielsweise durch Verfahren wie explorative Datenanalyse, Regressionsanalyse oder maschinelles Lernen stattfinden.

Aus den durch die Datenanalyse erkannten Zusammenhängen können nun Anforderungen abgeleitet werden. Der zusammengefasste Prozess der Anforderungsableitung ist in Abbildung 2 dargestellt.

3.2.2 Validierung von Anforderungen (anforderungsbasiert)

Die vorgestellte Methode kann auch angewendet werden, um eine bestehende Anforderung unter Nutzung von Realverkehrsdaten zu validieren oder um nötige Anpassungen aufzuzeigen, welche die Verträglichkeit der Anforderung mit durchschnittlichem Fahrverhalten im Realverkehr erhöhen.

Diese Anwendung ist in Abbildung 2 dargestellt. Ausgehend von der bestehenden Anforderung werden dabei zunächst relevante Verkehrsszenarien und Kontexte definiert und in eine Szenariendefinition nach dem Szenarienkonzept der BASt überführt. Anschließend werden diese Szenarien aus Trajektoriendaten extrahiert und ermöglichen damit eine strukturierte Untersuchung der gegebenen Anforderung. Für die extrahierten Szenarien werden relevante

Parameter identifiziert, deren Verteilung und Zusammenhänge im Rahmen einer Datenanalyse untersucht werden. Es lassen sich aus den Auswertungen zudem geeignete Wertebereiche für Auslegungsparameter motivieren. Auch hier kann eine subjektive Bewertung der jeweiligen Szenarien bzgl. kooperativen Fahrverhaltens die Datengrundlage anreichern. Basierend auf den Ergebnissen dieser Phase erfolgt dann die Bewertung der initialen Anforderung bezüglich des durchschnittlichen realen Fahrverhaltens. Hieraus lassen sich konkrete Änderungen formulieren, um die Anforderung zu optimieren.

4. Ergebnisse

Die vorgestellte Methode wurde sowohl daten- als auch anforderungsbasiert unter Nutzung verschiedener Szenarien angewendet. Die Untersuchungen werden dabei auf der Datenbank von leveLXData durchgeführt. Diese enthält unter anderem hochgenaue Trajektoriendaten von Messorten auf deutschen Autobahnen aus Drohnenvideos sowie entsprechende digitale Karten. Für die Domäne Autobahn unterscheidet die Datenbank zwischen PKW, Vans, Pickups, LKW, Bussen und Motorrädern.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Szenarien lag der Fokus auf fließendem Verkehr. Daher wurde eine Teilmenge von 10 Orten der leveLXData-Datenbank mit einem Gesamtumfang von ca. 30 h Aufnahmezeit und über 150.000 Trajektorien betrachtet. Dabei wurden Orte mit möglichst fließendem Verkehr ausgewählt. Zudem weist der Ausschnitt eine hohe Variation bzgl. Topologie und Struktur der enthaltenen Orte sowie Verkehrsdichte auf.

4.1 Anwendung des datenbasierten Ansatzes

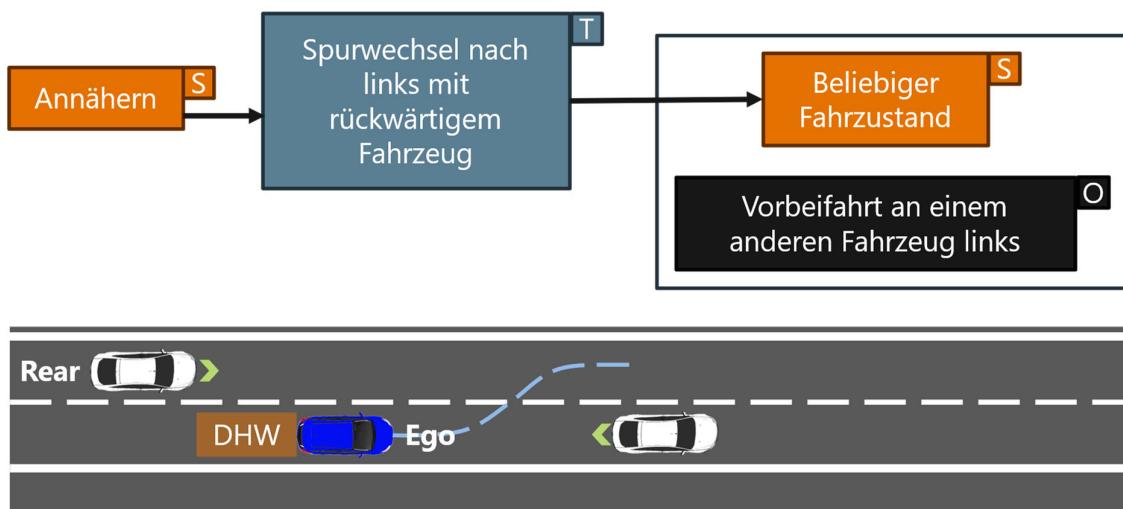


Abbildung 3: Komplexes Szenario „Links überholen mit belegter Nebenspur“ im Szenarienkonzept der BASt als Abfolge von Grundszenarien. Enthalten sind die drei Klassen

von Grundszenarien: *Fahrzustände (S)*, *Transitionen (T)* und *überlagerte Interaktionen (O)*. Das Szenario setzt sich zusammen aus einer Annäherungsphase, einem Spurwechsel nach links, gefolgt von einer beliebigen Anordnung von Fahrzuständen, während der das Ego-Fahrzeug ein Fahrzeug links passiert. Pfeile kennzeichnen erwartete relative Geschwindigkeiten bzgl. des Ego-Fahrzeugs. Zudem dargestellt ist der Sicherheitsabstand, zu Englisch *Distance Headway (DHW)*, zwischen Ego- und Rear-Fahrzeug.

Für die Evaluierung der Methode wurde das Szenario „Links überholen mit belegter Nebenspur“ genutzt, das in Abbildung 3 dargestellt ist. Dabei wechselt das Ego-Fahrzeug auf den links benachbarten Fahrstreifen, um ein langsameres Fahrzeug auf dem eigenen Startfahrstreifen zu überholen. Auf dem Zielfahrstreifen befindet sich dabei ein relevantes rückwärtiges Fahrzeug (Rear-Fahrzeug) mit meist höherer Fahrgeschwindigkeit. Um das Fahrszenario klar abzugrenzen, wurde sichergestellt, dass mit Ausnahme des Ego-Fahrzeugs kein beteiligtes Fahrzeug einen Spurwechsel während des Szenarios durchführen darf. Auf der betrachteten Teilmenge der Datenbank wurden 171 dieser Szenarien extrahiert.

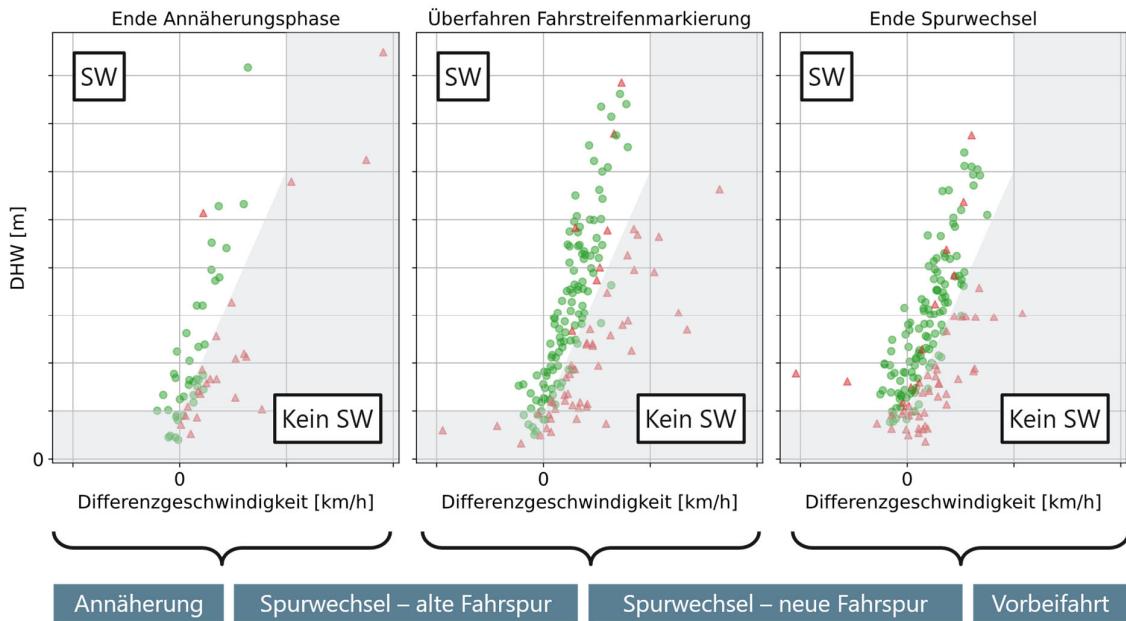


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Differenzgeschwindigkeit und des Sicherheitsabstands (DHW) zwischen Ego- und Rear-Fahrzeug für das gezeigte Spurwechselszenario zu drei Zeitpunkten (Ende der Annäherungsphase, Überfahren der Fahrstreifenmarkierung, Ende des Spurwechsels). Aus Verteilung und Klassifizierung (grüne Kreise=kooperativ, rote Dreiecke=unkooperativ) ergeben sich die dargestellten Wertebereiche, in denen ein Spurwechsel kooperativ durchgeführt werden kann („SW“) oder nicht („Kein SW“). Eine positive Differenzgeschwindigkeit entspricht einem schnelleren Rear-Fahrzeug.

Für die extrahierten Szenarien wurde das Zusammenspiel zwischen Ego- und Rear-Fahrzeug insbesondere bzgl. kooperativen Fahrverhaltens untersucht. Es wird die Frage beantwortet, unter welchen Bedingungen, d.h. bei welchen Parameterausprägungen, der Spurwechsel des Ego-Fahrzeugs durch das Rear-Fahrzeug als kooperativ bewertet wird. Die Analyse der Kostenterme bzgl. Kooperation hat unter anderem ergeben, dass der Sicherheitsabstand zwischen Rear- und Ego-Fahrzeug (DHW) und die Differenzgeschwindigkeit beider Fahrzeuge von besonderer Relevanz sind. Diese Kenngrößen sind in Abbildung 4 gegenübergestellt.

Um die Szenarien aus Fahrersicht der Rear- und Ego-Fahrzeuge erlebbar zu machen, wurden diese in einer Simulationsumgebung abgespielt. Durch diesen Ansatz wurden alle Szenarien subjektiv bzgl. kooperativen Fahrverhaltens annotiert, um die Datengrundlage entsprechend anzureichern.

Durch eine explorative Datenanalyse von Differenzgeschwindigkeit und DHW und unter Nutzung der subjektiven Klassifizierung lassen sich dann Bereiche definieren, in denen ein kooperativer Spurwechsel durchgeführt werden kann. Die Darstellung zeigt, dass ein Spurwechsel bei Unterschreitung eines festen Sicherheitsabstands und bei Überschreitung einer festen Differenzgeschwindigkeit zwischen Rear-Fahrzeug und Ego-Fahrzeug nicht durchgeführt werden sollte. In einem Übergangsbereich wurde ein linearer Zusammenhang festgestellt.

4.2 Anwendung des anforderungsbasierten Ansatzes

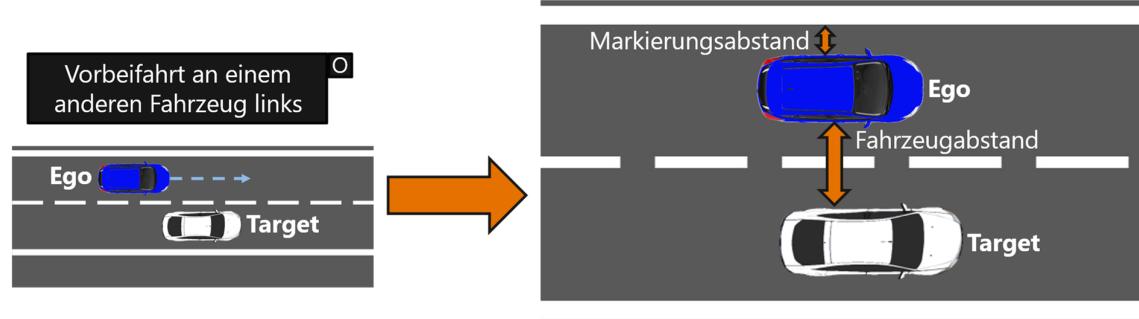


Abbildung 5: Basiszenario „Vorbeifahrt an einem anderen Fahrzeug links“ im Szenarienkonzept der BASt mit extrahierten Metriken: Seitlicher Abstand zum Target-Fahrzeug (Fahrzeugabstand) und seitlicher Abstand zur linken Spurmarkierung (Markierungsabstand).

Neben dem schon vorgestellten datenbasierten Ansatz ist es durch den anforderungsbasierten Ansatz möglich, bestehende Anforderungen anhand von realen Verkehrsdaten zu validieren. Als Anwendungsbeispiel hierfür wird die Verifikation einer aus der StVO abgeleiteten

verketteten Anforderung genutzt. Dazu wird das Basisszenario „Vorbeifahrt an einem anderen Fahrzeug links“ betrachtet, bei dem das Ego-Fahrzeug ein Target-Fahrzeug auf dessen linker Seite passiert.

Die Anforderung beinhaltet bzgl. des Ego-Fahrzeugs neben einem Grenzwert für den seitlichen Abstand zum Target-Fahrzeug auch einen Grenzwert für den seitlichen Abstand zur linken Spurmarkierung (siehe Abbildung 5).

Als Datengrundlage wurden dazu alle Szenarien dieses Typs aus der zuvor vorgestellten Teilmenge der leveLXData-Datenbank extrahiert. Zur weiteren Eingrenzung der Daten wurde sichergestellt, dass das Target-Fahrzeug über den gesamten Verlauf des jeweiligen Szenarios identisch ist.

Obwohl in den betrachteten Daten keine Staus auftraten, variierte die Länge der betrachteten Szenarien stark, da die longitudinale Differenzgeschwindigkeit zwischen Ego- und Target-Fahrzeug über einen großen Wertebereich verteilt war.

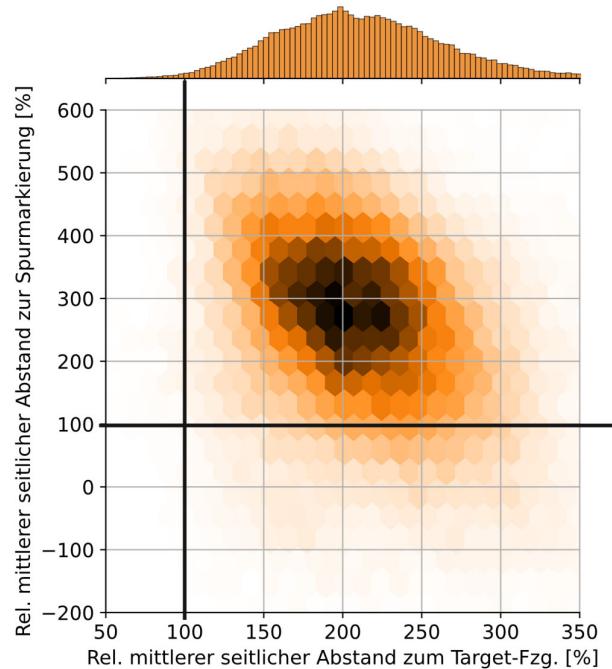


Abbildung 6: Auswertung der mittleren seitlichen Abstände des Ego-Fahrzeugs zum Target-Fahrzeug und zur linken Spurmarkierung. Es ist jeweils der prozentuale Grad der Erfüllung des in der Anforderung definierten Grenzwerts aufgetragen (Konformitätslevel). Dabei entspricht 100% einer exakten Einhaltung des geforderten Werts. Somit ergibt sich beispielsweise für 90% eine Unterschreitung des Grenzwerts aus der Anforderung um 10% und für 200% ein Halten eines doppelt so großen Abstands wie gefordert.

Für eine einheitliche Gewichtung der Szenarien unabhängig von deren Länge wurden für die Anforderungsvalidierung daher die Mediane der Metriken pro Szenario betrachtet. Da in diesem Fall nur die Über- bzw. Unterschreitung der definierten Grenzwerte untersucht werden sollte, wurde die relative Abweichung des Medians zum Grenzwert betrachtet. Insgesamt konnte die Anforderung auf diese Weise mit über 70.000 Szenarien aus realen Verkehrsdaten abgeglichen werden, deren Verteilungen hinsichtlich der Abweichung von der Anforderung in Abbildung 6 dargestellt sind. Die Ergebnisse zeigen, dass der Grenzwert für den seitlichen Abstand zum Target-Fahrzeug in über 99% aller analysierten Vorbeifahrten eingehalten wird. Beim seitlichen Abstand zur linken Spurmarkierung wird der Grenzwert hingegen in knapp 14% der Fälle unterschritten. Außerdem ist ersichtlich, dass in etwa 5% der Fälle die Spurmarkierung überfahren wird. In diesem Fall ist die Anforderung zu maximal 0% erfüllt. Daraus lässt sich schließen, dass die verkettete Anforderung in den extrahierten Szenarien aus Realverkehrsdaten meist erfüllt wird.

5. Fazit

Im Rahmen dieses Beitrages wurde eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, datenbasiert und praxisbezogen Anforderungen für kooperativ agierende Fahrerassistenzsysteme aus Realverkehrsdaten abzuleiten oder bestehende Anforderungen unter Nutzung von Realverkehrsdaten auf Konformität mit durchschnittlichem Verkehrsverhalten abzugleichen. Das Vorgehen erlaubt es, Anforderungen für kooperatives Fahrverhalten zu definieren, wie am Beispiel eines genau definierten Spurwechselszenarios gezeigt. Außerdem konnte die Validität einer bestehenden Anforderung an eine automatisierte Fahrfunktion hinsichtlich der lateralen Abstände einer Vorbeifahrt geprüft und bestätigt werden.

Neben den betrachteten Beispielen kann die Methode auf eine Vielzahl weiterer Szenarien übertragen werden. Dies eröffnet große Potentiale, effizient und praxisorientiert Anforderungen für hochautomatisierte Fahrfunktionen abzuleiten. Außerdem ermöglicht die Methode eine kontinuierliche und datenbasierte Verifikation abgeleiteter oder bestehender Anforderungen während des gesamten Fahrzeugentwicklungsprozesses. So kann schnell auf ein volatiles Umfeld sich ändernder Rahmenbedingungen (z.B. gesetzlich, länderspezifisch oder technisch) reagiert werden und trotz steigender Komplexität (System, Straßenverkehr etc.) ein kundenzentriertes, hochautomatisiertes Fahrerlebnis entwickelt werden.

6. Literaturangaben

- [1] Fan, W. et al.: Impact of Connected and Automated Vehicles (CAVs) on Freeway Capacity, University of North Carolina at Charlotte (Department of Civil and

- Environmental Engineering), Online: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/61597> (Zugriff am 10.03.2025), 2019
- [2] Krajewski, R. et al.: The highD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Vehicle Trajectories on German Highways for Validation of Highly Automated Driving Systems, 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) S. 2118-2125, DOI 10.1109/ITSC.2018.8569552, 2018
- [3] Orlovska, J. et al.: THE USE OF VEHICLE DATA IN ADAS DEVELOPMENT, VERIFICATION AND FOLLOW-UP ON THE SYSTEM, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference S. 2551-2560, DOI 10.1017/dsd.2020.322, 2020
- [4] Schöner, H.: "How Good Is Good Enough?" In Autonomous Driving, Electronic Components and Systems for Automotive Applications S. 119-142, ISBN 978-3-030-14156-1, 2019
- [5] Riedmaier S. et al.: Survey on Scenario-Based Safety Assessment of Automated Vehicles, IEEE Access, vol. 8, S. 87456-87477, DOI 10.1109/ACCESS.2020.2993730, 2020
- [6] Gerwinn S. et al.: Statistical Model Checking for Scenario-Based Verification of ADAS, Control Strategies for Advanced Driver Assistance Systems and Autonomous Driving Functions: Development, Testing and Verification, S. 67-87, ISBN 978-3-319-91569-2, 2019
- [7] Moers, T. et al.: The exiD Dataset: A Real-World Trajectory Dataset of Highly Interactive Highway Scenarios in Germany, 2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) S. 958-964, DOI 10.1109/IV51971.2022.9827305, 2022
- [8] Poggenhans, F. et al.: Lanelet2: A High-Definition Map Framework for the Future of Automated Driving, 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) S. 1672-1679, DOI 10.1109/ITSC.2018.8569929, 2018
- [9] Weber, H. et al.: Evidenzorientierte Ableitung von Grundszenarien für die Bundesautobahn. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2023
- [10] Düring, M.: Fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem für automatische Fahrzeuge, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2017
- [11] Knies, C. T.: Bewertung kooperativer Verhaltensplanung für automatisierte Fahrzeuge auf Autobahnen, Technische Universität München, Dissertation, 2022