

Zum Fahrmanöverbegriff im Kontext automatisierter Straßenfahrzeuge

Inga Jatzkowski, Marcus Nolte, Torben Stolte, Till Menzel,
Robert Graubohm, Susanne Ernst, Markus Steimle, Nayel
Salem, Jan Richelmann und Markus Maurer

Technischer Bericht – Version 0.8 (7. Mai 2021)

Kurzfassung

Die Entwicklung sicherer automatisierter Fahrzeuge ist ein höchst interdisziplinärer Prozess und erfordert so die Zusammenarbeit von Entwickelnden unterschiedlicher Fachbereiche. Um die Kommunikation zwischen den beteiligten Personen möglichst frei von Missverständnissen und Fehlkommunikation zu halten, wird ein einheitliches Vokabular benötigt. Ein zentraler Begriff für die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge ist der des (sicheren) Verhaltens. Für die Beschreibung des sicheren Verhaltens wird in der Literatur häufig der Begriff des (Fahr-) Manövers verwendet, eine Betrachtung der relevanten Literatur zeigt jedoch, dass aktuell weder eine einheitliche Definition des Begriffs noch ein einheitlicher Satz an definierten Manövern existiert. Mit dem Ziel einer einheitlichen Begriffsdefinition wird in diesem Beitrag zunächst eine umfassende Literaturübersicht zum Fahrmanöverbegriff vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf deutsch- und englischsprachiger Literatur aus dem Kontext der Fahrzeugautomatisierung. Aufbauend auf dieser Übersicht wird eine vereinheitlichte Definition des Begriffs Fahrmanöver, Definitionen begleitender Terminologie, sowie ein Satz an Basismanövern vorgeschlagen.

1 Einleitung

Die Fahrzeugsystemtechnik ist ein hoch interdisziplinäres Feld in Industrie und Forschung. Gerade bei sicherheitskritischen Systemen, wie automatisierten Fahrzeugen, ist die reibungslose Kommunikation zwischen involvierten Entwicklerinnen und Entwicklern ein wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Systemrealisierung [26]. Dies betrifft sowohl die allgemeine Kommunikation über Entwicklungsgegenstände, als auch die Definition von (Teil-)Systemgrenzen und Schnittstellen.

Ein gemeinsames Vokabular während der Entwicklung hilft, sicherheitskritische Missverständnisse im Entwicklungsprozess zu vermeiden. Mögliche Missverständnisse, die primär syntaktischer Natur sind, führen möglicherweise zu finanziellen Einbußen aufgrund von notwendigen Anpassungen durch eine fehlgeschlagene Integration der Teilsysteme. Bei einer syntaktisch passenden Schnittstellenabstimmung, jedoch einem semantischen Missverständnis über die Bedeutung der an den Schnittstellen ausgetauschten Daten wird ein solches Missverständnis möglicherweise erst spät in der Integration der Teilsysteme aufgedeckt. Bleiben solche Missverständnisse unbemerkt, kann dies sicherheitskritische Auswirkungen haben.

Im Gegensatz zur Luft- und Raumfahrt oder zur klassischen Automobilentwicklung, handelt es sich beim automatisierten Fahren um ein verhältnismäßig junges wissenschaftliches Feld. Dementsprechend fehlen an vielen Stellen noch etablierte Prozesse sowie das nötige Fachvokabular bzw. die nötige Fachterminologie. Im Kontext der szenariobasierten Entwicklung [27] automatisierter Fahrzeuge ist vor allem das sichere Fahrzeugverhalten ein immer wieder betrachtetes Konzept [28, 29]. In der Literatur wird gleichzeitig häufig der Begriff des (Fahr-) Manövers verwendet, um das Verhalten eines Fahrzeugs über einen festgelegten Zeithorizont im öffentlichen Straßenverkehr zu beschreiben. Das gesamte Verhalten des Fahrzeugs kann somit durch die Komposition einzelner Manöver ausgedrückt werden. Bisher gibt es jedoch weder eine allgemein anerkannte Definition des Begriffs „Fahrmanöver“ noch einen einheitlichen Satz an Fahrmanövern. In der Regel werden die Begriffe „Fahrmanöver“ und „Manöver“ synonym verwendet. Gleiches gilt für diesen Beitrag.

Diese Veröffentlichung soll durch die Definition von Begriffen zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens, speziell des Begriffs des „Fahrmanövers“, zum Fachvokabular im Bereich der Fahrzeugautomatisierung beitragen. Idealerweise sollte die Definition des benötigten Fachvokabulars durch Standardisierungsgremien aufgegriffen und weitergeführt werden.

Ziel dieses Beitrags ist es daher, die bestehenden Definitionen des Begriffs „Fahrmanöver“ zu analysieren und darauf aufbauend eine einheitliche Definition des Begriffs vorzuschlagen. Zudem wird ein Satz von Basismanövern präsentiert und deren Zuordnung zum Manöverbegriff argumentiert. In Abschnitt 2 wird eine Übersicht über den aktuellen deutsch- und englischsprachigen Veröffentlichungsstand gegeben. In Abschnitt 3 werden anhand der Literaturübersicht und einer Analyse der Anwendungsbereiche des Manöverbegriffs Anforderungen an die Definition des Manöverbegriffs sowie an die Definition der Manöver abgeleitet. Darauf aufbauend werden im Abschnitt 4 der Begriff „Fahrmanöver“ definiert. Es folgen Definitionen zusätzlicher Terminologie zur Beschreibung von Fahrmanövern und die Abgrenzung des Fahrmanöverbegriffs von weiteren Begriffen zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung. In Abschnitt 5 wird ein Satz an Basismanövern definiert und in Bezug zu den in der Literatur definierten Manövern gesetzt. Abschließend erfolgt in Abschnitt 6 eine Überprüfung der Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Terminologie und eine Diskussion des Begriffes im Kontext funktionaler bzw. logischer Systemarchitekturen.

2 Fahrmanöver in der Literatur

Der Manöverbegriff wird in zahlreichen Veröffentlichungen in der deutsch- und englischsprachigen Literatur eingeführt und verwendet. Gleiches trifft auf die Benennung unterschiedlicher Manöver zu. Sowohl das Verständnis des Begriffs als auch eine Definition unterschiedlicher Manöver ist in der Literatur uneinheitlich. In Unterabschnitt 2.1 wird daher das verfügbare Begriffsverständnis aufgearbeitet. Anschließend werden in Unterabschnitt 2.2 die in der Literatur verwendeten Manöverausprägungen vorgestellt.

2.1 Begriffsverständnis

Der Begriff „Fahrmanöver“ wird in der Literatur häufig verwendet, aber vergleichsweise selten explizit definiert. Vielfach wird implizit ein Begriffsverständnis angelehnt an den allgemeinen Sprachgebrauch angenommen.

Manöver werden bei allen Autoren genutzt, um das Verhalten eines Fahrzeugs im Kontext seiner Umgebung abstrahiert von der konkreten Ausführung der Bewegung zu beschreiben.

Michon [30] nutzt die Unterteilung der Fahraufgabe in strategische, taktische und operative Ebene, wie sie auch von Donges [31] verwendet wird. Michon sowie Donges [31] geben an, dass Fahrerinnen und Fahrer auf taktischer Ebene Manöverregelung ausüben, um die aktuelle Situation zu beherrschen. Michon und Donges ziehen so eine explizite Verknüpfung zwischen einer taktischen Entscheidung und dem Fahrmanöverbegriff.

Bzgl. der Definition des Fahrmanöverbegriffs können in der betrachteten Literatur im Wesentlichen zwei gegensätzliche Begriffsverständnisse identifiziert werden: Im ersten Fall werden Fahrmanöver als diskrete Zustände des Systems verstanden, zwischen denen das System wechseln kann. Im zweiten Fall werden Fahrmanöver als Übergang zwischen quasi-stationären Systemzuständen verstanden. Der zweite Fall entspricht eher dem allgemeinsprachlichen Begriffsverständnis eines Fahrmanövers [32]. In der Literatur hat sich allerdings über die Zeit das Verständnis von Fahrmanövern als diskrete Systemzustände durchgesetzt.

Unter dem Gesichtspunkt dieser gegensätzlichen Begriffsverständnisse erfolgt im Folgenden eine Übersicht über das vorhandene Verständnis des Begriffs „Fahrmanöver“. Im Unterabschnitt 4.1 folgt aufbauend darauf ein Vorschlag für eine Definition des Fahrmanöverbegriffs, mit dem Ziel eine konsistente Definition für den Bereich der Fahrzeugautomatisierung zu schaffen.

2.1.1 Manöver als Übergang zwischen quasi-stationären Systemzuständen

Nach Dickmanns [33, 34, S.43] sind Manöver eine zeitliche Abfolge von Regelgrößen, um ein quasi-stationäres Verhalten in ein anderes zu überführen. Dickmanns stimmt hier mit dem allgemeinsprachlichen Verständnis eines Fahrmanövers überein, indem explizit nur Zustandsübergänge zwischen quasi-stationären Zuständen als Manöver definiert werden.

Hartjen u. a. [19] definieren ein Fahrmanöver als die Überführung eines Verkehrsteilnehmers von einem definierten Zustand in einen anderen, dieser kann dabei identisch zum vorhergehenden Zustand sein. Die Autoren basieren die von ihnen vorgestellte Definition auf der Definition von Dickmanns [33]. Sie weichen bei der Definition der einzelnen Manöver jedoch von Dickmanns [33] ab, indem sie auch das Fahrstreifenhalten oder den Stillstand als Fahrmanöver definieren, welche nach

Dickmanns keine Manöver darstellen, da sie keinen Wechsel zwischen quasi-stationären Zuständen beschreiben.

Ebenfalls aufbauend auf der Definition von Dickmanns [33] definieren Sippl u. a. [35] Manöver als Abfolge von Steuergrößen, um von einem Satz von Regeln eines stabilen Verhaltens in einen anderen zu wechseln. Ein Verhalten kann dabei durch ein Manöver bzw. ein Tupel von Manövern repräsentiert werden. Hierdurch folgt jedoch innerhalb der Definitionen, dass ein Manöver sowohl einen Verhaltenswechsel als auch ein Verhalten selbst definiert. Auch dies widerspricht der Manöverdefinition nach Dickmanns [33], da so das stabile Verhalten als Manöver bezeichnet werden kann. Wie Hartjen u. a. [19] weichen Sippl u. a. [35] bei der Definition einzelner Manöver von ihrer Manöverdefinition ab und bezeichnen das Folgen als Manöver, welches nach Dickmanns [33] kein Manöver darstellt.

Auch Reschka [10] und Klimke u. a. [25] beziehen sich auf die Definition des Manöverbegriffs nach Dickmanns [33]. Reschka [10] weicht jedoch in der Definition eines Manöverkatalogs von dieser Definition ab. Auch definiert er etwa das Folgen als Fahrmanöver.

Klimke u. a. [25] definieren Manöver als zielorientierten Prozess mit einem Anfang und einem Ende, der über einen längeren Zeitraum andauert. Manöver beschreiben dabei Transitionen von einem Punkt einer Situation zu einem anderen. Anders als [10, 19, 35] weichen sie in der Definition der Manöver nicht von dieser Definition ab. So bezeichnen Klimke u. a. das Halten eines Fahrstreifens sowie das Halten einer Geschwindigkeit als laterale bzw. longitudinale Basisfahraufgabe und Transitionen zwischen zwei Ausprägungen dieser Basisfahraufgaben als Manöver.

Schreiber [14] führt Manöver als abgeschlossene Handlungseinheiten ein. Der Autor definiert ein Fahrmanöver als Bahnführungskommando, welches jedoch im weiteren nicht weiter spezifiziert wird. In einer Probandenstudie, vgl. [32, 13], in der Probanden Manöver eines Fahrzeugs in verschiedenen Anwendungsfällen identifizieren sollten, wurden von den Probanden nur diskrete Zustandswechsel wie etwa ein Fahrstreifenwechsel als solche identifiziert. Das Folgen eines Fahrstreifens oder eines anderen Fahrzeugs wurde im Allgemeinen nicht als Manöver benannt. Dies macht das allgemeinsprachlichen Verständnis eines Fahrmanövers als Übergang zwischen quasi-stationären Zuständen deutlich. Schreiber führt daraufhin eine Unterteilung von Fahrmanövern in implizite und explizite Manöver ein: „*Ein explizites Fahrmanöver ist ein aus der Sicht des Fahrers in sich abgeschlossener Teil der Bahnführungsaufgabe, [...]*“ [14, S. 57] während „*ein implizites Fahrmanöver [...] ein nicht zwingend abgeschlossener Teil der Bahnführungsaufgabe des Fahrers [ist], der durch ein explizites Manöver, ein anderes implizites Manöver oder durch das Fahrmissionsende beendet wird.*“ [14, S. 57]. Explizite Fahrmanöver stellen somit auch nach Dickmanns [33] Fahrmanöver dar, implizite Fahrmanöver jedoch nicht.

Franz [36] baut auf [14] auf und nutzt dieselbe Definition von Fahrmanövern als abgeschlossene Handlungseinheiten sowie die Unterscheidung zwischen expliziten und impliziten Manövern.

Bei Kramer [20] ist ein Fahrmanöver „*eine vorgegebene Abfolge von Tätigkeiten, die ausgeführt werden müssen, um ein Ziel zu erreichen*“ [20, S. 54]. Als Ziel versteht Kramer dabei eine neue Verkehrssituation. Ein Manöver beschreibt nach Kramer somit einen Situationsübergang. Kramer nutzt ebenfalls die Aufteilung in explizite und implizite Manöver aus [14, 36], begründet diese jedoch nicht.

Auch in der Schifffahrt wird ein Manöver als Transition zwischen zwei quasi-stationären Zuständen verstanden. Der Begriff des „Manövers“ wird in der DIN ISO 13643 [37] definiert als „*im Schiffsbetrieb vorgenommene Maßnahmen zur Änderung von Kurs und/oder Geschwindigkeit bzw. bei Ubooten auch der Tiefe. [...] Besondere Aktionen, z. B. für das Ablegen, Ausweichen oder Retten (Person-über-Bord) sind ein-*

geschlossen.“ [37, S. 8].

2.1.2 Manöver als diskreter Systemzustand

Das Verständnis von Fahrmanövern als diskrete Systemzustände bietet den Vorteil, dass sich ein Fahrzeug zu jeder Zeit in einem eindeutigen Systemzustand befindet. Auch ist keine zusätzlichen Begriffsdefinitionen nötig, um die quasi-stationären Zustände zu beschreiben, zwischen welchen über ein Manöver ein Zustandswechsel stattfindet, wie etwa in [14, 25].

Dies zeigt sich bei Özgüner u. a. [6] sowie Fujita u. a. [5], die Manöver als diskrete Zustände in einem endlichen Automaten verstehen und diese für die automatisierte Fahrzeugführung nutzen.

Siedersberger [11] bezeichnet Fahrmanöver auch als Fahrhandlungen. Diese Fahrhandlungen können nach Siedersberger im Sinne von verhaltensorientierten Architekturen als „Verhaltensmuster“ verstanden werden. Weiterhin sei mit einem Fahrmanöver eine relativ klare stereotype Vorstellung über das zu erwartende Fahrverhalten verbunden. Siedersberger ordnet den Fahrmanöverbegriff sowohl der taktische als auch der strategischen Ebene zu [11, S. 97] und weicht damit von Michon [30] und Donges [31] ab, welche den Begriff nur der taktischen Ebene zuordnen.

Schröder u. a. [12] nutzen Vorarbeiten von Pellkofer [38] und definieren Verhaltensweisen auf strategischer, taktischer und reaktiver Ebene. Die Autoren nutzen hier den Begriff „Manöver“ für die Beschreibung des Verhaltens auf strategischer Ebene [31], abweichend vom Großteil der hier vorgestellten Literatur, die den Manöverbegriff der taktischen Ebene zuordnen. Schröder u. a. definieren zusätzlich „taktische Verhaltensweisen“, welche dem Manöververständnis der hier vorgestellten Literatur entsprechen. Diese „taktischen Verhaltensweisen“ koordinieren die Fahrzeugbewegung in einer Zeitspanne von zwei bis zehn Sekunden und nutzen reaktive Verhaltensweisen, um diese Fahrzeugbewegung umzusetzen.

Schneider [39] definiert ein Fahrmanöver als „eine Aktion bzw. Aktionsfolge (Aneinanderreihung mehrerer Aktionen) eines Verkehrsteilnehmers, welche die aktuelle Fahrsituation in eine neue Fahrsituation überführt“ [39, S.19]. Dabei wird der Situationsbegriff nach Reichart [3] verwendet. Eine Fahrsituation wird definiert als der „aus Fahrersicht prinzipiell wahrnehmbaren Ausschnitt der Verkehrssituation“ [39, S.14], also der „objektiv gegebene räumliche und zeitliche Konstellation der verkehrsbezogenen Einflussgrößen der Arbeitsumgebung von Verkehrsteilnehmern“ [39, S.14]. Schneider definiert Manöver auf taktische sowie reaktiver Ebene [31] und betrachtet auch Lenkbewegungen, Beschleunigungen und Verzögerungen als Manöver. Dieses Verständnis von Aktionen als Manöver, die der Fahrzeugstabilisierung dienen, ist eher die Ausnahme innerhalb der Literatur.

Bach u. a. [40] nutzen Manöver ebenfalls, um das Verhalten, Aktionen und Interaktionen von und zwischen Verkehrsteilnehmern auf einer abstrakten Ebene zu spezifizieren. Manöver stellen nach Bach u. a. eine abstrakte Repräsentation von Aktionen dar, die als Zustände in einem Graph darstellbar sind. Übergänge zwischen diesen Zuständen werden durch das Auftreten bestimmter Situationen bzw. Ereignisse ausgelöst. Bach u. a. beschreiben somit explizit wie sich Manöver als Sequenz aneinanderreihen lassen und wann ein Übergang zwischen zwei Manövern stattfindet.

Auch Mauritz [41] bedient sich der Definition eines Manövers über Aktionen. Demnach sei ein Manöver jede Aktion, die von einem dynamischen Objekt, bspw. einem Fahrzeug, ausgeführt wird. Ein Manöver kann nach Mauritz instantan sein oder eine beliebige Dauer besitzen. Zudem können Manöver zu komplexeren Manövern kombiniert werden [41, S. 238]. Die Aktionen, die ein Manöver

ausmachen kann, werden in der Arbeit nicht weiter spezifiziert. Es bleibt somit unklar, ab wann eine Aktion als Manöver klassifiziert werden kann. Ohne weitere Spezifikation könnte auch das Aktivieren der Fahrzeugbeleuchtung als Aktion und somit als Manöver angesehen werden.

Czarnecki [16] definiert Manöver als Fahraufgaben, die im Wesentlichen taktische Aspekte des Fahrens betreffen, einschließlich Funktionen zur Objektdetektion, Evaluation dieser und Reaktion auf diese, wie sie von einem SAE-Level-3-, -4- oder -5-System [42] ausgeführt werden. Czarnecki spezifiziert dabei für jedes Manöver sowohl die typische Fahrzeugbewegung, als auch Anforderungen an Umfeldwahrnehmung, Umfeldinterpretation und Regelung der Fahrzeugdynamik. Dieses Manöververständnis geht deutlich über das Verständnis eines Manövers als abstrahierte Fahrzeugbewegung hinaus und ähnelt den im Rahmen des California PATH Programms [43] entwickelten sogenannte „behavioral competencies“. Diese „behavioral competencies“ stellen Verhaltenskompetenzen dar, welche ein automatisiertes Fahrzeug für die Teilnahme am Straßenverkehr beherrschen muss. Diese wurden von der National Highway Traffic Safety Association (NHTSA) in den USA aufgegriffen und erweitert [44]. Diese Verhaltenskompetenzen sind den oben definierten Fahrmanövern ähnlich, spezifizieren jedoch zusätzlich Anforderungen an Umfeldwahrnehmung und -interpretation sowie die daraus resultierende Interaktionen mit Verkehrsteilnehmern. Auch Verhalten in Notsituationen wird teils über die Verhaltenskompetenzen abgedeckt. Da diese Verhaltenskompetenzen deutlich über das Begriffsverständnis des Fahrmanövers hinausgehen, werden sie hier nicht weiter betrachtet.

2.1.3 Fazit

Wie oben bereits angesprochen, existieren im Wesentlichen zwei gegensätzliche Verständnisse des Fahrmanöverbegriffs in der Literatur: das Verständnis eines Manövers als Zustandsübergang und das Verständnis eines Manövers als Zustand.

Das Verständnis eines Manövers als Zustandsübergang entspricht dem allgemeinsprachlichen Gebrauchs des Begriffs, wie auch Schreiber [14] in einer Probandenstudie feststellt. Die Nutzung dieses Begriffsverständnis bietet unter anderem den Vorteil, dass der Manöverbegriff bei eine Kommunikation mit der Öffentlichkeit wenig bis keiner Erklärung bedarf. Bei Nutzung dieses Begriffsverständnis für die Fahrzeugautomatisierung, wird jedoch zusätzlich die Definition eines Begriffs benötigt für die Zustände zwischen denen ein Zustandsübergang also ein Manöver stattfindet.

Das Verständnis eines Manövers als diskreter Systemzustand weicht vom allgemeinsprachlichen Gebrauch ab und bedarf daher bei Kommunikation mit der Öffentlichkeit zusätzlicher Erklärung. Es bietet allerdings den Vorteil, dass keine zusätzliche Begriffsdefinition nötig ist. Zudem befindet sich das Fahrzeug bei diesem Verständnis zu jeder Zeit in einem definierten Systemzustand. Dies lässt sich jedoch auch mit dem Verständnis des Manövers als Zustandsübergang erreichen sofern dieses um die Definition der Zustände erweitert wird zwischen denen ein Zustandsübergang stattfindet.

Wie sich anhand der oben vorgestellten Literatur erkennen lässt, dominiert das Verständnis eines Manövers als diskreter Systemzustand im Vergleich zum Verständnis als Zustandsübergang. Wenn eine Definition eines Manövers als Zustandsübergang angeführt wird, wird diese zudem häufig nicht konsequent umgesetzt.

2.2 Manöver in unterschiedlichen Anwendungsbereichen

Für die Identifikation von Manövern, die in der Literatur verwendet werden, wurden die Disziplinen der (automatisierten) Fahrzeugführung, der Manöveridentifikation, der Fahrerausbildung bzw. Fahrermodellierung sowie der Verifikation und Validierung betrachtet. Zusätzlich zu der folgenden Literaturübersicht wurde eine tabellarische Übersicht zur Zuordnung der betrachteten Quellen zu den jeweiligen Disziplinen und den konkret betrachteten Manövern erstellt. Es wurde sich dabei auf Veröffentlichungen beschränkt, welche einen umfangreichen, möglichst vollständigen oder für einen ausgewählten Anwendungsbereich vollständigen Satz an Manövern definieren. Veröffentlichungen, welche nur einzelne Manöver für eine bestimmte Anwendung nutzen, ohne diese speziell zu definieren wurden in der folgenden Übersicht nicht berücksichtigt.

Eine Übersicht der in den betrachteten Veröffentlichungen definierten Manövern kann Tabelle 1 entnommen werden. Es wird deutlich, dass keine einheitliche Definition von Manövern existiert und dass der Abstraktionsgrad teils stark variiert. Einzelne Manöver lassen sich nach Donges [31] sowohl einem strategischen (z. B. „Abbiegen“) als auch einem taktischen (z. B. „Fahrstreifenwechsel“) oder einem operativen (z. B. „Bremsen“) Abstraktionsgrad zuordnen. Gleichzeitig zeigt Tabelle 1 auch die Zuordnung der Manöver zu verschiedenen Disziplinen der Fahrzeugführung.

2.2.1 Fahrerausbildung & Modellierung Fahrerverhalten

McKnight und Adams [1] strukturieren die gesamte Fahraufgabe in Unteraufgaben für die Verwendung in der Fahrerausbildung in Fahrschulen. McKnight und Adams beschreiben dabei Aufgaben, die eine menschliche Fahrerin oder ein menschlicher Fahrer vor, während und nach der Fahrt durchführt beziehungsweise durchführen muss. Innerhalb dieser Aufgaben werden Unteraufgaben spezifiziert, die für ein menschlich geführtes Fahrzeug ausgeführt werden müssen. Ein Teil dieser Unteraufgaben lässt sich der Führungsebene nach Donges [31] zuordnen und somit als Fahrmanöver interpretieren. McKnight und Adams bezeichnen diese jedoch nicht explizit als Manöver sondern stellen diese als Teilaufgaben der Fahraufgabe dar, welche sie anschließend feiner untergliedern. Die Granularität der Aufgaben reicht dabei von stabilisierenden Aufgaben wie Beschleunigen und Lenken über Führungsaufgaben wie dem Folgen eines anderen Fahrzeugs oder einem Fahrstreifenwechsel bis zu Navigationsaufgaben wie dem Planen einer Route zum Zielort.

Ein Anwendungsfall im Bereich der Modellierung von Fahrerverhalten ist die Modellierung von menschlichem Fehlverhalten. Ähnlich zu McKnight und Adams [1] präsentieren Fastenmeier und Gstalter [2] eine Analyse der Fahraufgabe. Wie McKnight und Adams modellieren Fastenmeier und Gstalter die Fahraufgabe auf einer Verhaltensebene, so dass die modellierten Fahraufgaben in ihrem Abstraktionsgrad Manövern ähnlich sind. Die Autoren präsentieren eine Analysemethode zur Identifikation des Normalverhaltens eines Fahrers in einer Situation und der Ableitung der Anforderungen an einen Fahrer in dieser Situation. Mithilfe dieser soll eine Fahrerüberlastung und resultierende Fehler abgeleitet werden. Die Autoren geben dabei allerdings nur die Analysemethode sowie ein Anwendungsbeispiel an, jedoch keinen kompletten Manöverkatalog. Fastenmeier und Gstalter schlagen eine Aufteilung der Fahraufgabe in longitudinale Aufgaben und Aufgaben an Kreuzungen vor. Die longitudinalen Aufgaben gliedern die Autoren in acht Unteraufgaben. Aufgaben an Kreuzungen hängen nach den Autoren vom Kreuzungstyp ab und werden nicht angegeben.

Reichart [3] nutzt Fahrmanöver für die Entwicklung normativer Modelle des menschlichen Fahr-

Tabelle 1: Übersicht über unterschiedliche Manöver in der Literatur (FA: Fahrerausbildung & Modellierung Fahrerverhalten)

Literaturquellen → Manöverarten ↓	FA				Fahrzeugführung										Manöver- identifikation				Verifikation & Validierung		Summe						
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]		[21]	[22]	[23]	[24]	[25]	
Vorderfahrzeug folgen	•				•	•	•	•							•						•	•	•	•		12	
Fahrstreifen/Fahrspur folgen	•		•	•	•	•	•	•							•		•				•	•	•	•	•	•	19
Folgen		•		•						•	•					•								•		8	
Vorausfahren	•	•			•																					3	
Beschleunigen; Bremsen	•																				•	•				4	
Parken; in eine Parklücke einfahren; aus einer Parklücke herausfahren	•						•	•	•	•				•						•	•		•	•	•	11	
Notstop	•										•															2	
Sicheres Anhalten											•														•	2	
Stop						•					•	•														3	
Stillstand								•				•	•	•							•					5	
Am Straßenrand halten							•	•						•	•											5	
Fahrstreifenwechsel; Fahrspurwechsel	•				•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	21
Auffahren; Abfahren	•			•							•					•								•		5	
Überholen	•	•	•				•	•						•	•							•	•		•	12	
Überholt werden	•	•			•																			•		4	
Unfallvermeidung von vorn/hinten	•				•																					2	
Annähern an Ob- jekt/Infrastruktur							•	•	•	•				•	•					•	•		•	•	•	12	
Anhalten	•											•									•		•			5	
Vor einem Gegenstand halten							•	•						•									•			4	
Anfahren	•					•	•	•	•	•				•	•					•	•		•	•		12	
Hinter einem anfahrenden Fahrzeug anfahren							•	•						•									•			4	
Passieren; Reaktion auf Hindernisse; an einem Gegen- stand vorbeifahren	•		•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	18
Umkehren	•						•	•	•	•				•	•								•	•		9	
Kehre fahren; U-Turn	•						•	•						•									•			5	
Abbiegen links/rechts	•		•				•	•	•	•	•		•	•	•	•				•	•		•	•		15	
Einbiegen			•																							1	
Geschwindigkeit halten; Geschwindigkeitswahl	•	•	•		•																•	•		•	•	•	9
Kreuzung überqueren	•		•				•	•	•		•			•	•	•				•	•		•	•		13	
Rückwärtsfahren	•						•	•						•						•	•				•	8	
Stop & Go		•										•														2	
Wegpunktfahrt												•														1	
Zurückfallen															•						•			•		4	
In Kreisverkehr einfahren															•											1	
In Fahrstreifen einordnen															•											1	
Einscheren; Ausscheren																									•	1	
Anzahl Manöver	23	8	7	9	9	14	17	18	9	9	14	5	7	18	8	19	2	9	16	5	14	18	10	12	10		

verhaltens, um die Leistungsfähigkeit der menschlichen Fahrerin beziehungsweise des menschlichen Fahrers in verschiedenen Fahrsituationen zu modellieren. Für die Festlegung der relevanten Fahrmanöver werden unterschiedliche Ansätze für die Auswahl von Fahrmanövern verglichen, unter anderem von Nagel [45] und von McKnight und Adams [1]. Reichart wählt sieben Fahrmanöver aus der betrachteten Literatur aus. Die Auswahl wird so getroffen, dass die Fahrmanöver zu den Unfalltypen, wie sie von der Forschungsgesellschaft Straßenverkehr (FGSV) festgelegt werden passen, um eine Zuordnung von Unfällen zu Fahrmanövern zu erleichtern.

Auch Hale u. a. [4] analysieren die Aufgaben menschlicher Fahrerinnen und Fahrer bei der manuellen Fahrzeugführung. Diese Analyse ähnelt der von McKnight und Adams [1], legt jedoch den Fokus auf die Modellierung menschlichen Fehlverhaltens als auf den Nutzen für die Fahrerausbildung. Hale u. a. beschränken ihre Analysen dabei auf den Anwendungskontext Autobahn.

2.2.2 Fahrzeugführung

Im Bereich der automatisierten Fahrzeugführung sind Publikationen zu Manövern ab Beginn der 1990er Jahre zu finden. Dabei werden definierte Fahrmanöver zunächst teils nicht explizit als Fahrmanöver benannt, sondern etwa als Fahrprogramme [5, 46] oder diskrete Zustände in einem endlichen Automaten [6] beschrieben. Referenzierende Arbeiten interpretieren diese als Fahrmanöver.

So beschreiben Fujita u. a. [5] und Okuno u. a. [46] neun „Fahrprogramme“ für die automatisierte Fahrzeugführung auf Autobahnen, welche beispielsweise von Tölle [9] mit Fahrmanövern gleichgesetzt werden.

Özgüner u. a. [6] definieren zwölf Zustände für einen übergeordneten Regler eines Automatisierungssystem für Highways. Diese werden von Kramer [20] als Manöver interpretiert und werden im Rahmen dieses Papiers als solche angesehen. Diese zwölf Zustände teilen Özgüner u. a. untergeordnet weiter in zehn longitudinale und vier laterale Zustände auf.

Nagel und Enkelmann [7] und Nagel [45] definieren im Rahmen des PROMETHEUS Projekts insgesamt 17 Fahrmanöver für ein automatisiertes Fahrzeug. Diese wurden initial für die Beschreibung von Verkehrsszenarien entwickelt. Bajcsy und Nagel [8] erweitern diese Fahrmanöver um das Manöver *Stillstand* für die Anwendung zur Fahrzeugführung.

Tölle [9] baut ebenfalls auf den Manövern von Nagel und Enkelmann [7] auf, fasst diese 17 Manöver jedoch zu neun Manövern für eine automatisierte Fahrzeugführung zusammen ohne die Erweiterung von Bajcsy und Nagel [8] einzubeziehen. Reschka [10] wiederum bezieht sich auf diese Definitionen der Fahrmanöver von Tölle und adaptiert diese für seine Zwecke.

Siedersberger [11] nutzt die Begriffe der Fahrmanöver und Fahrhandlungen gleichbedeutend und definiert 14 Fahrhandlungen für ein automatisiertes Straßenfahrzeug und verknüpft diese mit nötigen Fähigkeiten für deren Ausführung. Diese Fahrmanöver lassen sich in Teilen ebenfalls bei Maurer [47] und Pellkofer [38] finden.

Schröder u. a. [12] und Schröder [48] beziehen sich auf Vorarbeiten von Pellkofer [38] und spezifizieren taktische Verhaltensweisen, die nötig sind um einer Straße zu folgen. Zusätzlich definieren sie Aktionen auf Stabilisierungsebene, welche zur Ausführung der jeweiligen taktischen Verhaltensweisen nötig sind. Die Autoren geben dabei nur eine Auswahl und keinen vollständigen Manöverkatalog an.

Schreiber [14] vergleicht die Manöver von Tölle [9] sowie die von Bajcsy und Nagel [8] erweiterten

Manöver von Nagel [45] für die Anwendung auf Autobahnen. Dabei trifft Schreiber eine Auswahl von neun Manövern aus den betrachteten Manövern, die auf Autobahnen auftreten können, und vernachlässigt die Manöver, die auf Autobahnen nicht auftreten sollten. Im Rahmen einer automatisierten Fahrzeugführung werden diese Manöver genutzt, um einem Fahrer bzw. einer Fahrerin über eine Nutzerschnittstelle die Auswahl des auszuführenden Manövers zu ermöglichen. Franz [36] baut auf den von Schreiber [14] definierten Manövern auf und nutzt diese für die Weiterentwicklung der Nutzerschnittstelle aus [14].

Lotz [15] bezieht sich bei der Definition von Fahrmanövern auf Siedersberger [11] und bezeichnet analog Fahrmanöver als Verhaltensweisen. Der Autor nutzt dabei im Weiteren jedoch nur den Begriff der Verhaltensweisen und nicht die von Siedersberger [11] definierten Verhaltensweisen. Lotz leitet nötige Verhaltensweisen für ein automatisiertes Fahrzeug über die Betrachtung der Strukturelemente von Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen her. Über die Strukturelemente leitet der Autor das notwendige Verhalten ab, um mit diesen umzugehen. Zusätzlich betrachtet er von der Straßenverkehrsordnung vorgeschriebene Verhaltensweisen. Dabei identifiziert Lotz acht Fahrmanöver und ordnet diese den unterschiedlichen Anwendungsdomänen Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen zu.

Czarnecki [16] arbeitet zum einen 19 notwendige Manöver für ein automatisiertes Straßenfahrzeug heraus, zum anderen schlägt der Autor eine Methode zur systematischen Beschreibung dieser Manöver vor. Der genaue Anwendungsbereich der Manöver wird von Czarnecki nicht weiter spezifiziert. Czarnecki [16] bezieht sich bei der Definition der von ihm ausgewählten Fahrmanöver auf Barbera u. a. [17] und McKnight und Adams [1].

Barbera u. a. [17] beschreiben elementare Manöver als Teil eines Entscheidungsbaums. Diese sind dem Fahrverhalten unterlagert und fungieren als Eingangsdaten für die Generierung der Fahrzeugtrajektorie. Hierbei wird nur Auswahl an Fahrmanövern explizit spezifiziert.

2.2.3 Manöveridentifikation

Nur wenige Arbeiten zur Manöveridentifikation stellen einen größeren Manöverkatalog vor. Der Fokus vieler Arbeiten zur Manöveridentifikation liegt auf der angewandten Methodik und weniger auf der Beschreibung der zu identifizierenden Manöver.

Hermann und Desel [18] nutzen die von Tölle [9] definierten Manöver zur Erkennung des Manövers eines Ego-Fahrzeugs als Teil einer Analyse einer Fahrsituation. Hierbei passen die Autoren, die in [9] definierten Manöver für ihre Zwecke an. Weiterhin gruppieren die Autoren die gewählten Manöver in Aktionsmanöver ohne Beteiligung zusätzlicher Verkehrsteilnehmer und Interaktionsmanöver mit Beteiligung zusätzlicher Verkehrsteilnehmer.

Ähnlich zu Hermann und Desel [18] unterscheiden Hartjen u. a. [19] zwischen Fahrzeugzustandsmanövern, Infrastrukturmanövern und objektbezogenen Manövern für die Detektion von Manövern in Messdaten aus urbaner Umgebung. Diese extrahierten Manöver sollen anschließend genutzt werden, um logische Szenarien zu formulieren und diese mittels identifizierter statistischer Verteilungen in konkrete Szenarien nach Bagschik u. a. [27] für eine szenarienbasierte Absicherung zu überführen.

Kramer [20] beschreibt Manöver für die Nutzung dieser in einem Assistenten zur Optimierung der Energieeffizienz des Ego-Fahrzeugs. Kramer vergleicht hierfür die Fahrmanöver, die von Nagel [45],

Tölle [9], Siedersberger [11] und Okuno u. a. [46] definiert wurden. Zusätzlich nutzt Kramer die von Schneider [39] eingeführte Unterscheidung von expliziten und impliziten Fahrmanövern.

Vollrath u. a. [21] fassen die 17 Manöver von Nagel [45] zu 14 Manövern zusammen. Diese Zusammenfassung basiert dabei auf der Ähnlichkeit der Fahrerbelastung innerhalb der Manöver. Diese Manöver werden zur Erkennung von Fahrmanövern der Fahrerin beziehungsweise des Fahrers des Ego-Fahrzeugs genutzt, um diese in dem aktuellen Manöver zu unterstützen.

Bauer [49] spezifiziert sogenannte Basismanöver für die Ableitung eines umfangreichen Katalogs an Manöverkombinationen. Bauer nutzt diese Manöverkombinationen, um eine Manöverprädiktion menschengeführter Fahrzeuge zu realisieren, um diese in kritischen Situationen durch eine automatische Verzögerung zu unterstützen. Für die Festlegung der Basismanöver bezieht sich der Autor auf Nagel [45] und Tölle [9]. Die Basismanöver werden erweitert durch Straßentypen, Geschwindigkeitsbegrenzungen und andere Objekte im Fahrbahnbereich. Bauer kommt so auf 144 Manöverkombinationen je Basismanöver. Nach Ulbrich u. a. [50] würden diese Manöverkombinationen eher Szenarien als Fahrmanövern entsprechen.

2.2.4 Verifikation und Validierung

Basierend auf von der National Highway Traffic Safety Association (NHTSA) [44] definierten Verhaltenskompetenzen, welche ein automatisiertes Fahrzeug beherrschen muss präsentieren Thorn u. a. [22] ein Framework für den Test automatisierter Fahrfunktionen. Im Rahmen der Erarbeitung dieses Frameworks werden auch Fahrmanöver auf taktischer und operativer Ebene definiert, welche für die Einordnung der Verhaltenskompetenzen bestehender Automatisierungssysteme genutzt werden. Die Autoren beziehen sich bei der Definition der Fahrmanöver auf ein Expertengremium, jedoch nicht auf vorangegangene Veröffentlichungen.

Bagschik u. a. [23] nutzen eine Erweiterung der Fahrmanöver nach Reschka [10] für die Beschreibung von Szenarien auf deutschen Autobahnen für die Absicherung einer automatisierten Fahrfunktion in der Simulation.

Sipll u. a. [35] nutzen Manöver im Rahmen eines szenarienbasierten Entwicklungsprozess. Die Autoren definieren dabei selbst keine eigenen Manöver sondern beziehen sich auf die von Reschka [10] definierten Manöver und nutzen diese um Manöver mit Fahrzeugfähigkeiten zu verknüpfen.

Gyllenhammar u. a. [24] definieren sogenannte fundamentale Fahrzeugaktionen für Autobahnen. Im Zuge einer datenbasierten Szenarienerstellung sollen diese zur Absicherung automatisierter Fahrzeuge genutzt werden. Durch die Beschränkung auf Autobahnen ist wie auch von Gyllenhammar u. a. selbst angemerkt die definite Menge an Fahrzeugaktionen bzgl. anderer Anwendungskontexte nicht vollständig. Obwohl die Autoren mit den Fahrzeugaktionen in Bezug stehende Begriffe definieren oder sich auf bestehende Definitionen beziehen, findet eine Definition des Begriffs „Fahrzeugaktionen“ nicht statt. Die definierten fundamentalen Fahrzeugaktionen können jedoch weitestgehend mit Fahrmanövern gleichsetzen, auch da die Autoren diese der Ebene 4 des Ebenenmodells zur Szenarienbeschreibung nach Bagschik u. a. [23] zuordnen, auf welcher die Fahrmanöver der im Szenario beteiligten Fahrzeuge festgelegt werden.

Ähnlich zu Schröder u. a. [12] definieren Gyllenhammar u. a. [24] fundamentale Fahrzeugaktionen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen, wobei Aktionen höherer Abstraktionsebenen Aktionen niedrigerer Ebenen subsumieren. Wie Özgüner u. a. [6] teilen Gyllenhammar u. a. die Fahrzeugaktio-

nen in longitudinale und laterale Aktionen auf, um diese unabhängig voneinander untersuchen zu können. Dabei unterscheiden sich die in der Arbeit vorgeschlagenen fundamentalen Fahrzeugaktionen teils stark von sonst vorgestellten Manövern, da sie auf der höchsten Abstraktionsebene im Wesentlichen über die Interaktion mit anderen Fahrzeugen definiert werden. Der Großteil der sonst vorgestellten Arbeiten, mit Ausnahme von bspw. Hartjen u. a. [19] sowie Hermann und Desel [18], definieren Manöver unabhängig von anderen Verkehrsteilnehmern.

Klimke u. a. [25] definieren Manöver für die Spezifikation von Szenarien für ein szenarienbasiertes Testen automatisierter Straßenfahrzeuge während der Entwicklung. Klimke u. a. folgen dabei der Aufteilung in laterale und longitudinale Manöver bzw. Basisfahraufgaben, wie sie auch in [6] genutzt wird. Die Autoren definieren dabei vier laterale Manöver und Basisfahraufgaben und sechs longitudinale Manöver und Basisfahraufgaben. Klimke u. a. beziehen sich bei der Definition ihrer Manöver nicht auf andere verwandte Arbeiten.

2.2.5 Fazit

Bei Betrachtung der in Unterabschnitt 2.1 angeführten Begriffsdefinitionen und der, in den vorherigen Abschnitten betrachteten Anwendungsbereiche lässt sich erkennen, dass eine Mehrzahl der Publikationen auf die von Nagel und Enkelmann [7] und Nagel [45] definierten bzw. die von Tölle [9] zusammengefassten Manöver beziehen und diese für den jeweiligen Anwendungskontext adaptieren [8, 3, 10, 14, 13, 36, 18, 21, 49, 20, 21, 49, 23, 35]. Abweichend hiervon beziehen sich [38, 12, 48] auf die in [11] definierten Fahrhandlungen als Fahrmanöver und adaptiert diese. Zusätzlich zu diesen beiden Gruppierungen existieren einige Publikationen [1, 2, 4, 5, 6, 22, 16, 24, 17, 15, 19, 25], die Manöver unabhängig davon definieren. Teils treten dabei große Abweichungen sowohl zu den in [7, 45] als auch in [11] definierten Manövern auf.

Insgesamt ist eine große Zahl verschiedener definierter Manöver zu erkennen. Es lassen sich dabei allerdings einige Manöver identifizieren, die von nahezu allen Autoren definiert werden, siehe Tabelle 1. Aufbauend auf der Literaturübersicht lassen sich unterschiedliche Anwendungsbereiche identifizieren, die eine Manöverdefinition benötigen. Diese werden im Folgenden näher betrachtet und genutzt, um Anforderungen an eine Begriffsdefinition und die Definition von Basismanövern abzuleiten.

3 Betrachtung von Anwendungsgebieten und Ableitung von Anforderungen

Wie bereits in der Einleitung angeführt, benötigen Entwickelnde komplexer Systeme aus verschiedenen Anwendungsgebieten ein gemeinsames Vokabular, um Missverständnissen bei der Kommunikation vorzubeugen. Um festzulegen, was dieses gemeinsame Vokabular im Bezug auf eine Definition des Manöverbegriffs sowie einzelner Manöver leisten soll, werden im Folgenden Anforderungen an die Definition des Begriffs und die Definition der Manöver identifiziert. Erste Anforderungen folgen bereits aus den im Literaturreview angeführten Quellen.

Die Begriffsdefinition soll weitestgehend kompatibel mit der bereits existierenden Literatur sein und das implizit vorhandene Verständnis des Manöverbegriffs vereinheitlichen. Ziel ist es, hierdurch zum Konsens innerhalb der Literatur beizutragen.

Ein systematisches und strukturiertes Vorgehen ist eine Grundvoraussetzung für die Beherrschung der Komplexität und die Berücksichtigung der Sicherheitsaspekte moderner Fahrzeugsysteme, siehe etwa ISO 26262 [51]. Die vorgeschlagene Definition soll ein einheitliches Begriffsverständnis über den gesamten Entwicklungsprozess ermöglichen. Abbildung 1 zeigt einen abstrakten Referenzprozess für die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge in Anlehnung an Graubohm u. a. [52]. Es werden dabei nur die Prozessschritte aufgeführt, in denen eine abstrakte Beschreibung des Fahrzeugverhaltens benötigt wird. Diese Prozessschritte sind die *Konzeptphase*, der *Systementwurf* und die *Verifikation & Validierung*.

Im Folgenden wird eine Betrachtung der Anwendungsgebiete innerhalb dieser Prozessschritte angeführt. Anschließend werden die identifizierten Anforderungen strukturiert aufgeführt.

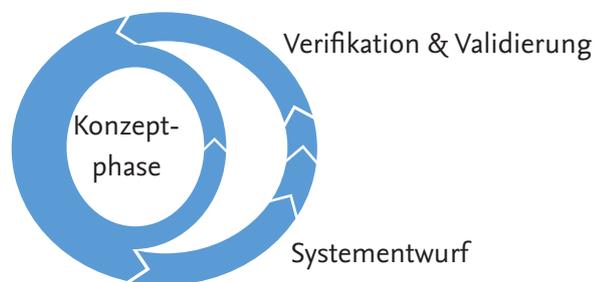


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung eines iterativen Referenzprozess für den Entwurf automatisierter Fahrzeuge und Fahrfunktionen nach Graubohm u. a. [52].

3.1 Betrachtung von Anwendungsgebieten

Entlang des in Abbildung 1 angeführten Referenzprozesses lassen sich folgende Anwendungsgebiete identifizieren in denen wir Bedarf für eine abstrakte Beschreibung des Fahrzeugverhaltens sehen und in denen Manöver als semantisches Beschreibungselement eingesetzt werden können: Innerhalb der Konzeptphase wird eine abstrakte Beschreibung des Fahrzeugverhaltens für die Funktionsdefinition und Sicherheitsanalyse des zu entwickelnden automatisierten Fahrzeugs benötigt [10]. Im Systementwurf werden unter anderem die einzelnen Teilsysteme konkretisiert, die das Gesamtsystem „automatisiertes Fahrzeug“ ausmachen. Teilsysteme, die dabei eine abstrakte Beschreibung des Fahrzeugverhaltens benötigen sind die Selbstwahrnehmung [53], die Verhaltensprädiktion [54] und die Verhaltensentscheidung [12]. Zudem ist auch während der Verifikation und Validierung des automatisierten Fahrzeugs eine abstrakte Beschreibung des Fahrzeugverhaltens nötig [23].

Zwischen den einzelnen Anwendungsgebieten bestehen Schnittstellen, so dass besonders für die Definition dieser ein einheitliches Verständnis essentiell ist.

Funktionsdefinition und Sicherheitsanalyse In der Konzeptphase der Entwicklung eines automatisierten Fahrzeugs wird die zu entwickelnde Funktion spezifiziert, z. B. in Form einer sogenannten „item definition“ nach ISO 26262 [51]. Darin wird unter anderem festgelegt, wie sich das Fahrzeug in seiner vorgesehenen Einsatzumgebung verhalten soll.

Diese Beschreibung des Fahrzeugverhaltens findet dabei zunächst auf einer abstrakten Ebene statt. Auf dieser wird beschrieben, wie sich das Fahrzeug in bestimmten Situationen verhalten soll, ohne

die Fahrzeugbewegungen detailliert im Zeitverlauf zu beschreiben. Diese abstrakte Beschreibung des Fahrzeugverhaltens kann unter Nutzung von Fahrmanövern realisiert werden.

Für die Festlegung des Fahrzeugverhaltens bzgl. der Einsatzumgebung und anderer Verkehrsteilnehmer können Referenzszenarien betrachtet werden. In diesen kann das Verhalten anderer Fahrzeuge und das des Ego-Fahrzeugs über die Ausführung von Fahrmanövern oder Sequenzen von Fahrmanövern ausgedrückt werden [10]. Werden Fahrmanöver für die Beschreibung des Fahrzeugverhaltens genutzt, muss mit jedem Manöver eine klare Erwartung an die resultierende Fahrzeugbewegung sowie resultierende Randbedingungen verbunden sein, um den zeitlichen Verlauf eines Szenarios beschreiben zu können.

In der Konzeptphase wird anschließend eine Gefährdungsanalyse und Risikobewertung (HARA) bzgl. der Verhaltenssicherheit¹ des automatisierten Fahrzeugs durchgeführt. Hierbei kann das spezifizierte Sollverhalten des Fahrzeugs in den Referenzszenarien als Grundlage genutzt werden. Abweichungen von dem spezifizierten Sollverhalten ergeben potentielle Gefährdungen, die in der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung betrachtet werden. Diese Abweichungen drücken sich durch eine Bewegung aus, die nicht in Übereinstimmung mit den als sicher spezifizierten Sollverhalten ist. Sollen Fahrmanöver zur Beschreibung des Sollverhaltens genutzt werden, ergibt sich hieraus, dass aus einem Fahrmanöver ein Sollverhalten hervorgehen muss, welches mit dem extern beobachtbaren Verhalten der Verkehrsteilnehmer eines Referenzszenarios auf Übereinstimmung oder Abweichung überprüft und dementsprechend bewertet werden kann.

Selbstwahrnehmung Für ein SAE-Level-3+-Fahrzeug [42] wird eine Überwachung der aktuellen Leistungsfähigkeit des Fahrzeugsystems gefordert. Die Selbstwahrnehmung für automatisierte Fahrzeugsysteme ist eine Grundlage für eine systemweite qualitative und quantitative Überwachung der Ausführungsgüte des Automatisierungssystems [53, 29]. Die Selbstwahrnehmung betrifft damit auch Teile des Entwicklungsprozesses im Sinne der Formulierung von Anforderungen an das sichere Fahrzeugverhalten [10, 29]. Die Selbstwahrnehmung liefert Informationen, um das Fahrzeugverhalten zur Laufzeit zu überwachen und zu erkennen, ob die aktuellen Fähigkeiten des Fahrzeugs für eine Realisierung sicheren Verhaltens ausreichen. Ein Ansatz für die Überwachung des Fahrzeugverhaltens stellen die von Reschka u. a. [56] vorgestellten Fähigkeitengraphen dar. In diesen werden die für ein Verhalten benötigten Fähigkeiten modelliert. Zur Laufzeit können diese Graphen genutzt werden, um die aktuelle Qualität der Fähigkeiten und ihren Einfluss auf das Fahrzeugverhalten zu überwachen. Die Fähigkeitengraphen können zusätzlich im Entwicklungsprozess genutzt werden, um Anforderungen an ein sicheres Fahrzeugverhalten abzuleiten [10, 29]. Fahrmanöver können auch hier genutzt werden, um das Fahrzeugverhalten zu strukturieren. Dabei sollten die Fahrmanöver atomar sein, um eine eindeutige Zuordnung von benötigten Fähigkeiten zu einem gewünschten Verhalten zu ermöglichen.

Verhaltensentscheidung und Verhaltensgenerierung Das in der Konzeptphase festgelegte Verhalten des Fahrzeugs in seiner Einsatzumgebung wird im Fahrzeug in Form einer Verhaltensentscheidung realisiert. Diese trifft während des Betriebs des Fahrzeugs Entscheidungen über das Fahrzeugverhalten in der aktuellen Situation. Hierbei können unterschiedliche Ansätze verfolgt werden, in-

¹Das Konzept der Verhaltenssicherheit als ein wesentlicher Aspekt der Sicherheit automatisierter Fahrzeuge wurde in [55] sowie in [28] adressiert.

nerhalb derer entweder zwischen verschiedenen Abstraktionsebenen in Verhaltensentscheidung unterschieden wird [57] oder nicht [58]. Wird zwischen verschiedenen Abstraktionsebenen unterschieden, so kann etwa im ersten Schritt eine Entscheidung für ein bestimmtes abstraktes Verhalten getroffen werden, dessen Ausführung in darauf folgenden Schritten genauer spezifiziert wird [57]. Dieses abstrakte Verhalten kann über Fahrmanöver realisiert werden.

Bei Nutzung einer manöverbasierten Verhaltensentscheidung sollten die verwendeten Fahrmanöver atomar und eindeutig sein, um eindeutiges Verhalten zu ermöglichen. Jede Verhaltens- und somit Manöverentscheidung wird dabei bzgl. der Erreichung eines übergeordneten Ziels getroffen, somit liegt jeder Verhaltensentscheidung auch eine Intention zu Grunde. Zudem wird ein Fahrzeugverhalten immer bzgl. eines Bezugssystems ausgeführt. Dabei kann es sich um ein lokales Bezugssystem wie der Fahrstreifenmitte handeln oder um ein globales Referenzsystem.

Verhaltensprädiktion Die Verhaltensentscheidung trifft Entscheidungen über die Bewegung des Ego-Fahrzeugs unter anderem auf Basis einer Repräsentation des statischen und dynamischen Umfelds. Das dynamische Umfeld setzt sich dabei aus den umliegenden Verkehrsteilnehmern zusammen. Um sich sicher zwischen diesen Verkehrsteilnehmern zu bewegen und mit ihnen zu kooperieren, werden nicht nur Informationen über die aktuelle Position der Verkehrsteilnehmer benötigt. Es sind zusätzlich Informationen über das mögliche zukünftige Verhalten dieser nötig in Form einer Verhaltensprädiktion. Eine solche Prädiktion kann auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen realisiert werden. Diese Abstraktionsebenen reichen dabei von einer Prädiktion des Einbiegens in eine Straße, eines Wechsels des Fahrstreifens, über eine prädizierte Linksbewegung relativ zu einer Referenz, eine Prädiktion möglicher Pfade oder Trajektorien hin zu einer Prädiktion einer Aufenthaltswahrscheinlichkeit [54]. Fahrmanöver können genutzt werden um die Prädiktion der Fahrzeugbewegung auf der Fahrstreifenebene (mesoskale Ebene [59]) zu strukturieren. Auf anderen Abstraktionsebenen können weitere Ansätze zur Strukturierung der Fahrzeugbewegung nützlich sein, wie etwa Missionselemente [38] auf Straßenebene (makroskale Ebene [59]) oder Manöverelemente [60] zwischen Fahrstreifenebene sowie eine Dynamikprädiktion [61] auf mikroskaler Ebene [59]. Es wird somit für die Verhaltensprädiktion eine Beschreibung des Fahrzeugverhaltens auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen benötigt, die sich klar voneinander abgrenzen lassen. Dabei sollten die einzelnen Ausprägungen des Verhaltens auf der jeweiligen Abstraktionsebene atomar sein, um Fehlinterpretationen bzgl. des Verhaltens soweit wie möglich zu vermeiden. Eine Unsicherheit bzgl. der Verhaltensprädiktion bleibt in der Regel bestehen [54].

Verifikation und Validierung Für die Verifikation und Validierung automatisierter Fahrzeuge werden vermehrt szenarienbasierte Ansätze [62] diskutiert. Hierbei wird (häufig simulationsgestützt) das realisierte System in unterschiedlichen Szenarien auf sicheres Verhalten getestet. Für die Definition der Szenarien muss das Verhalten der im Szenario vorhandenen Verkehrsteilnehmer spezifiziert werden [63]. Zudem muss festgelegt werden, welches Verhalten von dem zu testenden automatisierten Fahrzeug in einem Szenario erwartet wird. Dieses Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer sowie das erwartete Verhalten des automatisierten Fahrzeugs kann mithilfe von Fahrmanövern oder einer Abfolge von Fahrmanövern beschrieben werden. Dabei ist es wichtig, dass jedes Manöver in einem eindeutigen extern sichtbaren Verhalten resultiert.

3.2 Anforderungen

Aus dem Literaturreview, sowie den aufgeführten Anwendungsgebieten lassen sich zusammengefasst folgende Anforderungen an eine Begriffsdefinition und eine Definition von Manövern identifizieren.

Anforderungen an die Begriffsdefinition und die Definition von Manövern:

A₁: Die Begriffsdefinition und die definierten Manöver sollen für verschiedene Anwendungsgebiete (in der Fahrzeugautomatisierung) nutzbar sein.

Anforderungen an die Begriffsdefinition:

B₁: Die Begriffsdefinition soll mit existierender Literatur kompatibel sein.

B₂: Die Begriffsdefinition soll das innerhalb der Literatur implizit vorherrschende Begriffsverständnis abbilden.

Anforderungen an die Definition von Manövern:

C₁: Manöver müssen Fahrverhalten auf taktischer Ebene strukturieren können.

C₂: Einem Manöver muss eine Intention zugrunde liegen, d.h. Manöver müssen aus eindeutigen Entscheidungen hervorgehen.

C₃: Fahrmanöver müssen Handlungen von Fahrzeugen mit einer eindeutigen Intention in strukturierter Umgebung² beschreiben können³.

C₄: Manöver müssen für die Manöverdauer ein eindeutiges Bezugssystem haben.

C₅: Ein Manöver muss in Ergänzung zum Bezugssystem durch einen minimalen Satz an Beschreibungsparametern definiert werden können.

C₆: Manöver müssen atomar sein.

Unter Berücksichtigung der aufgezeigten Perspektiven ist die Ableitung einer einheitlichen Definition des Begriffs Fahrmanöver für automatisierte Straßenfahrzeuge sinnvoll und notwendig. Hierzu zählt auch die Definition eines Satzes an Basismanövern und deren Beschreibung. Dies kann einen Beitrag zur Konsistenz zwischen der Konzeption, der Realisierung und Implementierung sowie der Verifikation und Validierung eines automatisierten Fahrzeugführungssystem liefern.

²Unter strukturierter Umgebung wird dabei der durch entsprechende Infrastruktur und ein Regelwerk wie der Straßenverkehrsordnung [64] organisierte Straßenraum verstanden.

³Manöver sollen die einzelnen Handlungen eines Fahrzeugs in einem Szenario beschreiben. Um eine durchgängige Fahrzeugbewegung innerhalb eines Szenarios zu beschreiben, muss zusätzlich spezifiziert werden, wann das Manöver wechselt (Event).

4 Argumentation einer aktualisierten Terminologie zum Manöverbegriff

Die vorangegangenen Kapitel zeigen deutlich den Bedarf einer einheitlichen Definition des Manöverbegriffs und eines Satzes an Basismanövern. Nachdem in Abschnitt 3 basierend auf dem ausführlichen Literaturreview Anforderungen an beides abgeleitet wurden, wird in Unterabschnitt 4.1 zunächst eine Definition des Fahrmanöverbegriffs vorgeschlagen. Dieser soll das in der Literatur dominierende Begriffsverständnis konsolidieren. Anschließend wird in Unterabschnitt 4.2 eine Terminologie um den Fahrmanöverbegriff eingeführt. Diese Terminologie umfasst zum einen zur Beschreibung der Manöver nötige Begriffe. Zum anderen werden weitere Begriffe zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung eingeführt und zum Manöverbegriff in Bezug gesetzt.

4.1 Definition Fahrmanöverbegriff

Die folgende Definition des Begriffs „Fahrmanöver“ baut auf den in Abschnitt 3 aufgestellten Anforderungen auf. Sie soll so die Definition einheitlicher Schnittstellen und Gültigkeitsbereiche fördern. Basierend auf dem in der Literatur dominierenden Begriffsverständnis, schlagen wir folgende Definition des Begriffs „Fahrmanöver“ vor:

„Ein Fahrmanöver stellt eine logische Abstraktion möglicher systemdynamischer Zustandsgrößenverläufe einer Fahrzeugbewegung dar. Ein Fahrmanöver bildet einen diskreten Zustand im automatentheoretischen Sinne ab, der von außen nur bedingt beobachtbar ist. Jedes Fahrmanöver ist an eine Intention geknüpft.“

Ein Fahrmanöver ist somit durch eine aktive Entscheidung auf logischer Ebene bedingt. Die bedingte Beobachtbarkeit von Manövern ergibt sich daraus, dass sich Manöver teils nur über die zugrundeliegende Intention unterscheiden, welche von außen betrachtet für gewöhnlich nur eingeschränkt sichtbar ist. Abweichend von der Manöverdefinition der Schifffahrt (siehe DIN ISO 13643 [37]) sowie von der allgemeinsprachlichen Verwendung des Fahrmanöverbegriffs stellt ein Fahrmanöver in diesem Verständnis einen diskreten Systemzustand und keinen Zustandsübergang dar. Diese Definition weicht ebenso von Dickmanns [33] ab, welcher ein Fahrmanöver als Übergang zwischen zwei quasi-stationären Zuständen versteht. Das Verständnis eines Manövers als diskreter Systemzustand hat sich jedoch in der hier betrachteten Literatur überwiegend durchgesetzt, vgl. [6, 7, 9, 10, 12, 14, 40]. Wird eine funktionale Systemarchitektur nach Donges [31] verwendet, wie sie etwa in Matthaei und Maurer [65] oder Lotz [15] beschrieben ist, so handelt es sich bei der logischen Ebene um die taktische Ebene oder Führungsebene in der funktionalen Systemarchitektur.

Die Definition eines Manövers als Systemzustand bietet einige Vorteile gegenüber der Definition als Zustandsübergang. Zum einen stellt sie das in der den Autoren bekannten Literatur vorherrschende Verständnis von Fahrmanövern im automotiven Kontext dar. Zum anderen bietet sie den Vorteil, dass sich das Fahrzeugführungssystem immer in einem definierten Zustand befindet. Von einer Verwendung eines anderen Begriffs als „Fahrmanöver“ für die Beschreibung des Systemzustands, wie etwa bei Siedersberger [11] oder Klimke u. a. [25], wurde abgesehen.

Die vorgeschlagene Definition des Manöverbegriffs adressiert Anforderungen B₁ und B₂, kann diese aufgrund des unterschiedlichen Begriffsverständnisses in der Literatur jedoch nur zu einem

Teil erfüllen. Sie ermöglicht jedoch eine Einordnung der Arbeiten mit einem abweichenden Verständnis.

4.2 Terminologie

Anknüpfend an die Definition des Fahrmanöverbegriffs wird eine Terminologie um diesen vorgestellt. In der Literatur werden eine Reihe unterschiedlicher Begriffe zur Beschreibung von Fahrzeugbewegung und Fahrzeugverhalten verwendet. Diese Terminologie dient daher dazu den Manöverbegriff von anderen strukturierenden Elementen zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung abzugrenzen, sowie relevante Begriffe für die nähere Beschreibung der Manöver selbst zu definieren.

4.2.1 Begriffe zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung

Im Folgenden werden die Begriffe *Missionselement*, *Manöversequenz*, *Manöverprimitiv* und *Bewegungsprimitiv* definiert. Diese Begriffe ermöglichen eine Beschreibung der Fahrzeugbewegung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Sie erlauben zudem eine Abgrenzung des Begriff des Fahrmanövers zu anderen Begriffen zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung über den Abstraktionsgrad. Der hierarchische Bezug zwischen diesen Begriffen ist in Abbildung 2 veranschaulicht. Im Zuge der Definition dieser Begriffe wird auch ein Satz von Manöverprimitiven definiert.

Missionselement Ein *Missionselement* ist Teil eines Missionsplans, es strukturiert das Fahrzeugverhalten auf Ebene der Missions- oder Routenplanung und dient der Erreichung eines übergeordneten Ziels. „Missionselemente sind abstrakte Aufgabenbeschreibungen ohne Wissen darüber, wie diese vom System ausgeführt werden.“ [38, S. 129]. Eine Auswahl von Missionselementen wird etwa in [17, 38, 66] vorgestellt, im Kontext dieses Beitrags sollen jedoch keine Missionselemente spezifiziert werden. Ein Beispiel für ein Missionselement ist das Abbiegen in eine andere Straße [38].

Manöversequenz Eine *Manöversequenz* beschreibt eine Abfolge von Manövern. Sie kann durch Manöverübergangsbedingungen im Sinne auslösender Ereignisse weiter spezifiziert werden. Architektonisch ist eine Manöversequenz wie ein Manöver der taktischen Ebene nach Donges [31] zuzuordnen. Mithilfe von Manöversequenzen wird der aus einer Abfolge von Missionselementen bestehende Missionsplan in eine Abfolge von Fahrmanövern übersetzt.

Manöverprimitiv Ein *Manöverprimitiv* beschreibt qualitativ den Bewegungszustand des Fahrzeugs in Relation zum im aktuellen Manöver gültigen Bezugssystem [67]. Ein Manöverprimitiv wird longitudinal und lateral anhand der Änderung der Bezugsgröße bestimmt. Longitudinal ist dabei die Geschwindigkeit und lateral die Querablage die jeweilige Bezugsgröße. Mit dieser Wahl der Bezugsgrößen kann die Fahrzeugbewegung innerhalb der vorgeschlagenen Manöver beschrieben werden. Sie stellen die höchste zeitliche Ableitung der longitudinalen bzw. laterale Fahrzeugposition dar, die ohne weitere Zwangsbedingungen auskommt und die niedrigste zeitliche Ableitung, die die größte Menge an longitudinalen und lateralen Manövern abdecken kann. Ein Vorschlag für einen Satz an Manöverprimitiven findet sich in Tabelle 2. Manöverprimitive lassen sich für eine Beschreibung der

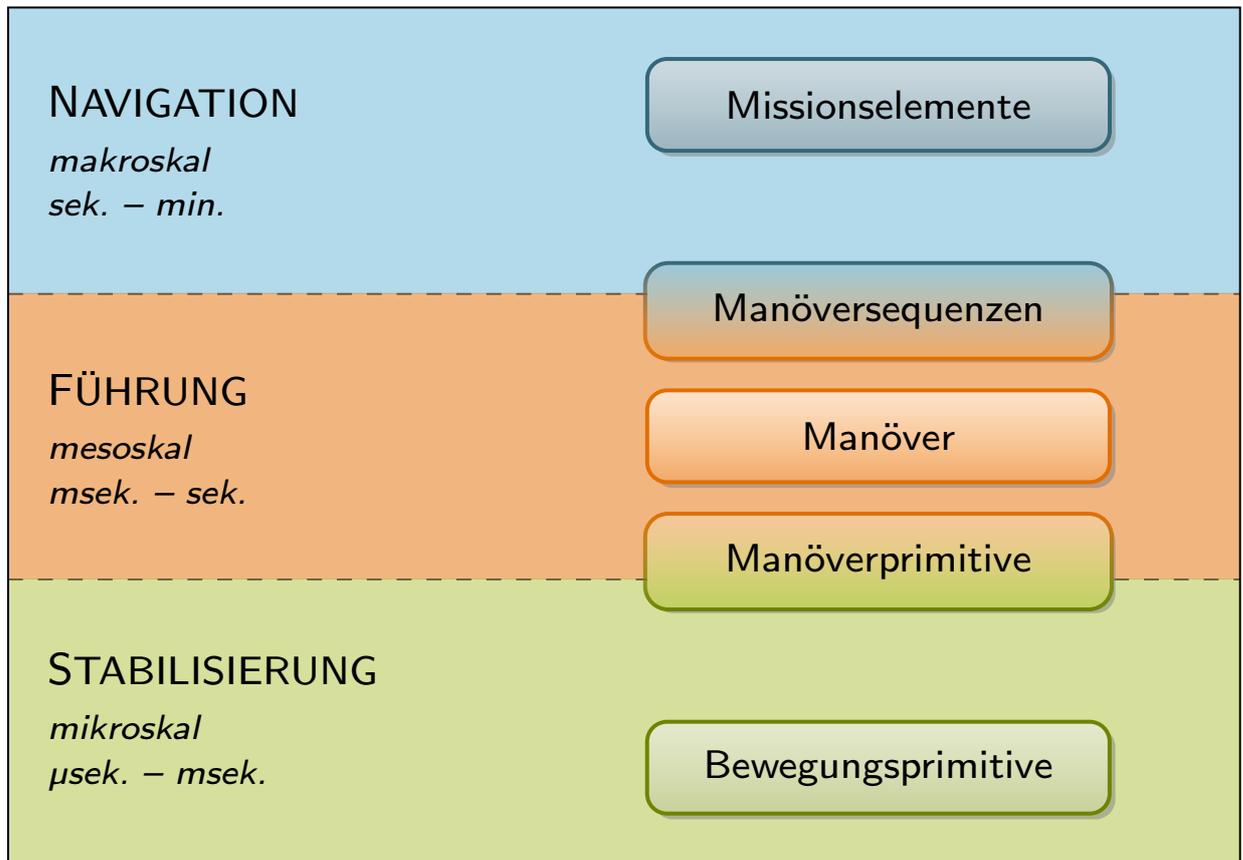


Abbildung 2: Zuordnung von strukturierenden Elementen zur unterschiedlichen Abstraktionsebenen in der Beschreibung der Fahrzeugbewegung. Dabei stellt die blau hinterlegte Ebene die abstrakteste Beschreibungsebene dar und die grün hinterlegte Ebene, die am wenigsten abstrakte Beschreibungsebene.

konkreten Bewegung des Fahrzeugs innerhalb eines Manövers nutzen. Hierarchisch sind Manöverprimitive daher einer niedrigeren Abstraktionsebene als Fahrmanövern zuzuordnen.

Tabelle 2: Longitudinale und laterale Manöverprimitive. Longitudinale Manöverprimitive nach Schuldt u. a. [67].

longitudinal	lateral
Stillstand	
Geschwindigkeit vergrößern	Querablage vergrößern
Geschwindigkeit halten	Querablage halten
Geschwindigkeit verkleinern	Querablage verkleinern

Bewegungsprimitiv *Bewegungsprimitive* beschreiben den Zustandsgrößenverlauf durch den ein Manöverprimitiv und darüber auch ein Manöver umgesetzt werden soll. Während ein Manöverprimitiv bzgl. desselben Bezugssystems definiert ist wie das zugehörige Manöver, ist ein Bewegungsprimitiv

mitiv im Fahrzeugkoordinatensystem definiert. Ein Bewegungsprimitiv kann etwa eine Gierbewegung, ein Beschleunigen oder ein Verzögern sein.

4.2.2 Begriffe zur Beschreibung von Manövern

Für die weitere Beschreibung von Manövern werden die Begriffe *Fahrstreifen*, *Bezugssystem*, *Manöverzone* sowie *Manövertemplate* definiert. Die Notwendigkeit der Definition dieser Begriffe ergibt sich zum einen aus der Definition des Manöverbegriffs in Unterabschnitt 4.1, zum anderen aus den Anforderungen in Abschnitt 3.

Fahrstreifen Ein *Fahrstreifen* ist ein strukturierendes Element des Straßenraums. Nach § 7 Absatz 1 der StVO ist ein „Fahrstreifen [...] der Teil einer Fahrbahn, den ein mehrspuriges Fahrzeug zum ungehinderten Fahren im Verlauf der Fahrbahn benötigt.“ [64]. Ein Fahrstreifen kann (real vorhanden und) durch Fahrstreifenmarkierungen auf der Fahrbahn gekennzeichnet sein oder durch Interpretation des Umfelds (durch Mensch oder Maschine) abgeleitet werden.

Bezugssystem Ein *Bezugssystem* ist ein Ausdrucksmittel zur Benennung räumlicher Relationen zwischen Objekten. Auf Manöverebene ist dieses Bezugssystem lokal durch einen Punkt im Fahrzeugumfeld und dazu definierte Raumrichtungen festgelegt wie etwa der Fahrstreifenmitte und dem Richtungsverlauf dieses Fahrstreifens als Frenet-Koordinatensystem. Das Bezugssystem für ein Manöver wird durch die Intention in einem Zielfahrstreifen festgelegt.

Manöverzone Eine *Manöverzone* ist ein für die Ausführung eines Manöver benötigter „Teilbereich des Straßenraums“ [9], dieser Straßenraum muss dabei nicht frei von Objekten sein, er muss jedoch grundsätzlich vorhanden sein. Siehe auch [7].

Manövertemplate Ein *Manövertemplate* beschreibt einen möglichen Parameterraum eines Manövers, der zu einer stereotypen Beschreibung des extern wahrnehmbaren Fahrzeugverhaltens geeignet ist.

5 Definition einer Menge von Manövern

Wie in Unterabschnitt 2.2 gezeigt, besteht auch bzgl. der Definition der Manöver selbst innerhalb der betrachteten Literatur kein Konsens. Daher wird zusätzlich zu der in Unterabschnitt 4.1 vorgeschlagenen Definition des Manöverbegriffs in Unterabschnitt 5.1 eine Grundmenge an Manövern definiert.

Entsprechend der Anforderungen in Abschnitt 3 ist ein Ziel hierbei, dass es sich bei den definierten Manövern um atomare Manöver bzw. Basismanöver handelt (Anforderung C6). Aus diesen können durch sequenzielle Verknüpfung komplexere Fahrzeugbewegungen über Manöversequenzen dargestellt werden. Die Manöver sind für den Einsatz in strukturierter Umgebung definiert. Bei der Auswahl der vorgeschlagenen Manöver wurde bewusst der Fokus auf das Normalverhalten eines Fahrzeugs gelegt, da ein korrektes Verhalten in einer Notsituation stark einzelfallbezogen ist⁴.

⁴vgl. auch [15, S. 34] bzgl. assistiertem Fahren

Anschließend an die Definition eines Satzes an Basismanövern werden diese in Unterabschnitt 5.2 in Bezug zu den in Unterabschnitt 2.2 aufgeführten Fahrmanövern in der Literatur gesetzt.

Abschließend werden die gewählten Fahrmanöver in Unterabschnitt 5.3 näher beschrieben. Dies umfasst eine sprachliche Beschreibung des jeweiligen Manövers. Es wird für jedes Manöver das Bezugssystem festgelegt und die Intention spezifiziert, die diesem Manöver zu Grunde liegt. Um den für ein Manöver relevanten Straßenraum festzulegen, wird für jedes Manöver eine Manöverzone definiert. Auch wird für jedes Manöver ein Manövertemplate angegeben. Die Verknüpfung von Manövern zu Manöversequenzen wird ebenfalls adressiert, indem mögliche vorausgehende und nachfolgende Manöver in Abbildung 3 als Zustandsdiagramm visualisiert wurden. Hierbei wird nicht betrachtet, dass ein Manöver auch während der Ausführung abgebrochen werden kann.

Über die Definition dieser Aspekte werden Anforderungen C2, C3, C4 und C5 adressiert.

5.1 Auswahl eines Satzes von Manövern

Wie Özgüner u. a. [6], Gyllenhammar u. a. [24] und Klimke u. a. [25] propagieren wir eine Aufteilung von Fahrmanövern in longitudinale und laterale Fahrmanöver. Diese Aufteilung ermöglicht die Erfüllung von Anforderung C6, dass Manöver atomar sein müssen, um Eindeutigkeit der Manöver zu ermöglichen.

Ohne diese Aufteilung, z. B. bei Betrachtung der von Tölle [9] definierten Fahrmanöver, könnte etwa das Fahrmanöver Fahrstreifenwechsel und das Fahrmanöver Annähern gleichzeitig aktiv sein, wenn ein Fahrstreifenwechsel auf einen Abbiegefahrstreifen oder hinter ein auf dem Nachbarfahrstreifen vorausfahrendes Fahrzeug durchgeführt wird. Dabei müsste klar spezifiziert werden, ob in longitudinaler Bewegungsrichtung das Manöver Annähern oder Fahrstreifenwechsel dominiert. Dies müsste für alle möglichen Manöverkombinationen festgelegt werden. Eine Aufteilung der Manöver in longitudinale und laterale Manöver reduziert somit in diesem Aspekt die Komplexität in der Modellierung der Fahrzeugbewegung für unterschiedliche Anwendungsbereiche. Diese Aufteilung stellt somit sicher, dass die Fahrzeugbewegung zu jedem Zeitpunkt mit genau einem Manöver pro Richtung (lateral und longitudinal) beschrieben werden kann.

Zusätzlich zur besseren Unterscheidbarkeit und erleichterten Modellierbarkeit, erlaubt diese Aufteilung bei Sicherheitsbetrachtungen, die Unterscheidung zwischen Fehlverhalten in longitudinaler und lateraler Richtung.

In der Verhaltensentscheidung lässt sich so die laterale und longitudinale Bewegung überlagern und unabhängig voneinander beeinflussen. Auch für die Überwachung zur Laufzeit können so die Fertigkeiten für die longitudinale und laterale Fahrzeugbewegung getrennt überwacht werden und gegebenenfalls in der Verhaltensentscheidung getrennt voneinander berücksichtigt werden.

In Tabelle 3 finden sich die vorgeschlagenen lateralen und longitudinalen Fahrmanöver. Für die Beschreibung der gesamten Fahrzeugbewegung zu einem Zeitpunkt ist immer genau ein laterales und ein longitudinales Manöver aktiv. Die longitudinalen Fahrmanöver können dabei sowohl vorwärts als auch rückwärts betrachtet beziehungsweise ausgeführt werden. Die lateralen Fahrmanöver *Fahrstreifen wechseln* und *Passieren* können sowohl nach rechts als auch nach links betrachtet beziehungsweise ausgeführt werden.

Ein Fahrmanöver wird immer relativ zu einem Bezugssystem ausgeführt. Das geltende Bezugssystem wird durch das aktive laterale Manöver festgelegt. Die Intention den lateralen Zustand zu

ändern führt zu einem Manöverwechsel und somit zu einer Änderung des Bezugssystems. Jedes longitudinale Manöver legt für seine Ausführung relevante Referenzen fest, wie einen Haltepunkt, an dem angehalten werden soll, oder ein Fahrzeug, dem gefolgt werden soll. Um eine mehrteilige Fahrzeugbewegung zu realisieren, beispielsweise das Überholen, werden Fahrmanöver als Manöversequenz aneinandergereiht.

5.2 Bezug der vorgeschlagenen Manöver zur Literatur

Im Folgenden wird gezeigt, wie die in Unterabschnitt 2.2 genannten Manöver aus der betrachteten Literatur mit den in Unterabschnitt 5.1 vorgeschlagenen Manövern zusammenhängen. Dabei treten unterschiedliche Fälle auf.

Im Folgenden werden zunächst die Manöver aufgeführt, welche aufgrund getroffener Einschränkungen nicht durch die vorgeschlagenen Manöver abgedeckt werden. Anschließend werden die Manöver, welche anderen Abstraktionsebenen zuzuordnen sind aufgeführt und diese Zuordnung argumentiert. Für die verbleibenden Manöver wird anschließend gezeigt, dass sich diese vollständig durch die vorgeschlagenen Manöver realisieren lassen.

5.2.1 Notmanöver und Manöver für unstrukturierte Umgebung

Die in der Literatur erwähnten Manöver *Notstop*, *Sicheres Anhalten* und *Unfallvermeidung von vorn & hinten* werden durch den expliziten Ausschluss von Notmanövern von den hier spezifizierten Manövern nicht abgedeckt.

Auch die *Wegpunktfahrt* wird durch die spezifizierten Manöver nicht abgedeckt, da sich die vorgeschlagenen Manöver auf strukturierte Umgebungen beschränken und die Wegpunktfahrt explizit für unstrukturierte Umgebungen vorgesehen ist.

5.2.2 Zuordnung von Manövern der Literatur zu anderen Abstraktionsebenen

Mit Bezug auf die in Unterabsatz 4.2.1 spezifizierten Manöverprimitive, lassen sich das *Bremsen* und *Beschleunigen* den Manöverprimitiven zuordnen, da diese zwei der spezifizierten Manöverprimitiven entsprechen. Ist mit dem Bremsen das Anhalten an einem bestimmten (Halte-)Punkt gemeint, so wäre dies durch das in Unterabschnitt 5.1 spezifizierte Manöver *Anhalten* realisiert.

Die vielfach aufgeführten Manöver *Abbiegen*, *Einbiegen* und *Parken* lassen sich den in Unterabsatz 4.2.1 definierten Missionselementen zuordnen. Abbiegen und Einbiegen unterschieden sich dabei lediglich darin, ob in eine untergeordnete oder übergeordnete Straße eingefahren wird.

Tabelle 3: Vorgeschlagene longitudinale und laterale Fahrmanöver.

longitudinal	lateral
Anfahren	Fahrstreifen halten
Verkehrsteilnehmer folgen	Fahrstreifen wechseln
Wunschgeschwindigkeit folgen	Passieren
Anhalten	

Sowohl das Abbiegen als auch das Einbiegen werden dabei durch die Routenplanung auf Ebene des Missionsplans vorgegeben und stellen somit keine aktive Entscheidung auf Manöverebene dar. Auf Manöverebene findet lediglich eine Auswahl des Fahrstreifens statt, um von einer Straße auf eine andere zu gelangen.

Auch das Parken stellt außerhalb von Notsituationen eine Entscheidung auf Ebene des Missionsplans dar, wenn etwa zum Ende einer Mission das Fahrzeug auf einer Parkfläche abgestellt werden soll. Die Entscheidung des Abstellens des Fahrzeugs außerhalb des fließenden Verkehrs stellt keine Entscheidung auf Manöverebene dar. Die Auswahl der konkreten Parklücke kann dabei auf Ebene der Manöverentscheidung geschehen. Das Einfahren in eine Parklücke (längs wie quer) lässt sich über eine Manöversequenz beschreiben.

5.2.3 Realisierbare Manövern der Literatur

Das vielfach als Manöver aufgeführte *Überholen* stellt nach Verständnis der Autoren dieser Arbeit eine Manöversequenz dar, da es sich durch eine Verkettung von Manövern zusammensetzen lässt. Die Manöver *Überholt werden* und *Vorausfahren* stellen nach der Definition des Manöverbegriffs in Unterabschnitt 4.1 kein Manöver dar, da es sich hierbei nicht um eine aktive Entscheidung des Ego-Fahrzeugs mit einer bestimmten Intention handelt.

Die *Geschwindigkeitswahl* bzw. das *Geschwindigkeit halten* wird durch das hier definierten longitudinale Manöver *Wunschgeschwindigkeit folgen* abgedeckt. Zudem schließt das Manöver *Wunschgeschwindigkeit folgen* den longitudinalen Anteil des Fahrstreifenfolgen (wenn zwischen dem Folgen des Fahrstreifen und dem Folgen eines Verkehrsteilnehmers unterschieden wird) ein, sowie des Folgens wenn keinem realen Objekt gefolgt wird.

Beim Manöver *Anfahren* wird bei den in Unterabschnitt 5.1 spezifizierten Manövern nicht zwischen dem Anfahren hinter einem anderen Fahrzeug und dem Anfahren ohne Vorderfahrzeug unterschieden sondern diese in einem Manöver zusammengefasst.

Ebenso wird das *Anhalten* vor einem Gegenstand und das Anhalten an beliebigen anderen Halteorten unter einem Manöver zusammengefasst. Das Manöver Anhalten schließt dabei auch den Anteil des Manövers *Annähern (an Objekt/Infrastruktur)* ein, wenn dabei bis in den Stillstand verzögert wird. Auch das Manöver *Stop* sowie der *Stillstand* sind im Manöver Anhalten eingeschlossen. Das Manöver *am Straßenrand halten* ist entweder über das Manöver Anhalten realisiert oder kann durch Kombination dieses mit einem Fahrstreifenwechsel auf bspw. einen Seitenstreifen realisiert werden.

Das hier spezifizierte Manöver *Verkehrsteilnehmer folgen* schließt das in der Literatur definierte Folgen eines Verkehrsteilnehmers ein. Zudem umfasst es den longitudinalen Anteil des Manövers *Folgen*, wenn bei diesem einem realen Objekt gefolgt wird. Auch das Manöver *Zurückfallen* ist über das Manöver *Verkehrsteilnehmer folgen* realisierbar, indem etwa ein Verkehrsteilnehmer auf einem Nachbarfahrstreifen ausgewählt wird zu dem ein bestimmter Abstand gehalten werden soll, so dass diesem ein Wechseln auf den Ego-Fahrstreifen ermöglicht wird. Soll das Manöver *Zurückfallen* genutzt werden um den Abstand zum vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer vergrößert werden, so kann dies über eine Parameteranpassung innerhalb des Manövers *Verkehrsteilnehmer folgen* realisiert werden. Auch das Manöver *Stop & Go* stellt ein Folgen eines Verkehrsteilnehmers bei niedrigen Geschwindigkeiten dar in Kombination mit den Manövern *Anhalten* und *Anfahren*.

Die in der Literatur aufgeführten Manöver *Kreuzung überqueren*, *Einfahren in / Ausfahren aus Kreis-*

verkehr, in *Fahrstreifen einordnen* und *Umkehren* sind über das hier spezifizierte laterale Manöver *Fahrstreifen halten* in Kombination mit einem bzw. einer Verkettung der hier spezifizierten longitudinalen Manöver realisierbar. Im Falle des Manövers *Kreuzung überqueren* argumentiert bereits [10], dass es sich hierbei um das Folgen eines Fahrstreifens handelt. Die Beachtung möglicher Vorfahrtsregeln hat dabei keinen Einfluss auf das Manöver selbst. Das Einfahren in bzw. Ausfahren aus einem Kreisverkehr kann mithilfe derselben Argumentation durch das laterale Halten des Fahrstreifens kombiniert mit einem der longitudinalen Manöver ausgedrückt werden.

Ebenso stellt das Einordnen in einen Fahrstreifen, wenn sich der aktuelle Fahrstreifen in mehrere Fahrstreifen aufteilt, lateral ein Halten eines der beiden durch die Aufteilung entstandenen Fahrstreifen dar kombiniert mit einem der longitudinalen Manöver. Ein *Umkehren* oder *Wenden* wird durch ein *Fahrstreifen halten* Manöver realisiert. Ein Umkehren im Sinne einer Kehrtwende über einen Abbiegefahrstreifen an einer Kreuzung kann wie ein Abbiegen als das Folgen eines Fahrstreifens angesehen werden. Eine Kehrtwende mittels einer Drei-Punkt-Wendung ist, sicher ausgeführt, einem Einpark- und anschließendem Ausparkvorgang in bzw. aus einer Querparklücke gleichsetzbar. Ein- und Ausparkvorgänge lassen sich über das *Fahrstreifen halten* Manöver in Kombination mit entsprechenden longitudinalen Manövern realisieren. Somit ist auch ein Wenden oder Umkehren durch die hier vorgeschlagenen Manöver abgedeckt. Mit dem lateralen Manöver *Fahrstreifen halten* ist auch der laterale Anteil der übrigen in Unterabschnitt 2.2 betrachteten Manöver bei welchen der Fahrstreifen nicht verlassen wird eingeschlossen.

Das Manöver *Fahrstreifen wechseln* wird in nahezu allen hier betrachteten Publikationen als Manöver aufgeführt und wird im lateralen Anteil auch von dem in Unterabschnitt 5.1 spezifizieren gleichnamigen Manöver realisiert. Zusätzlich kann auch ein Auffahren auf und Abfahren von bspw. einer Autobahn als einen Wechsel des Fahrstreifens angesehen werden, was auch der Argumentation in [15] entspricht. Auch ein Einscheren bzw. Ausscheren stellt einen Wechsel des Fahrstreifens dar.

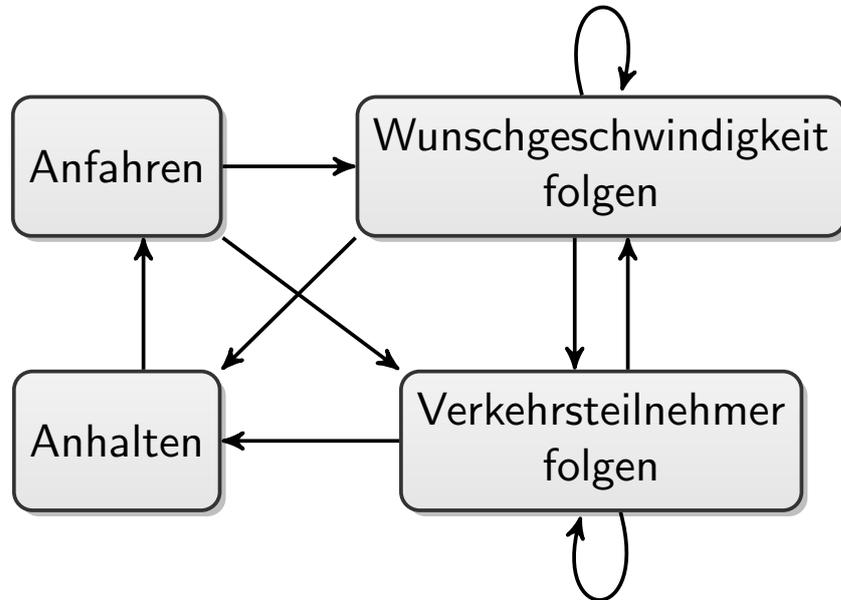
Ein *Passieren*, die *Reaktion auf Hindernisse* und das *an einem Gegenstand vorbeifahren* wird im lateralen Anteil von dem hier spezifizierten Manöver *Passieren* realisiert in Kombination mit einem der longitudinalen Manövern.

Das Manöver *Rückwärtsfahren* ist in den hier spezifizierten Manövern implizit enthalten, indem für die longitudinalen Manöver zwar eine Vorzugrichtung angegeben ist, diese jedoch auch in die entgegengesetzte Richtung ausgeführt werden können und somit ein Rückwärtsfahren ermöglichen.

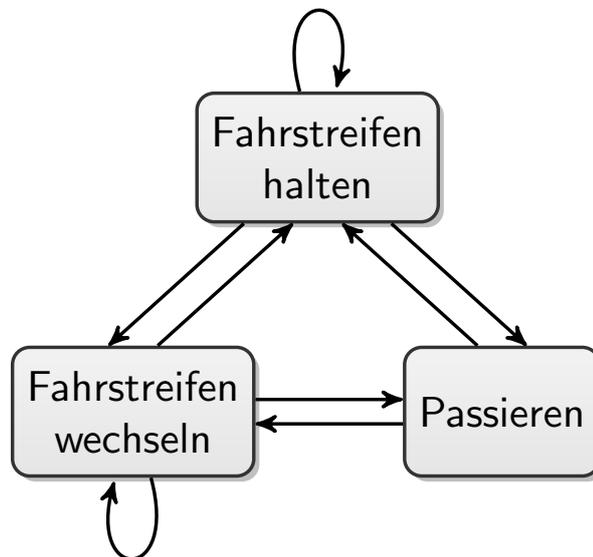
5.3 Beschreibung der Manöver

Im Folgenden wird für jedes Manöver die Intention spezifiziert, die ihm zu Grunde liegt. Anschließend werden die einzelnen Manöver textuell beschrieben und es wird für jedes laterale Manöver das Bezugssystem festgelegt. Um den für ein Manöver relevanten Straßenraum festzulegen, wird für jedes Manöver eine Manöverzone definiert. Auch wird jeweils ein Parameterraum im Sinne eines Manövertemplates angeführt, mit dem die externe Fahrzeugbewegung beschrieben werden kann. Die einzelnen Manövertemplates stellen hierbei für jedes Manöver lediglich einen beispielhaften stereotypen Parametersatz dar und können um weitere Templates ergänzt werden. Zusätzliche Templates können beispielsweise durch die Anforderungen eines Datenformats zur Szenarienbeschreibung im Rahmen einer simulativen Testdurchführung motiviert sein. Des Weiteren wird die Verknüpfung von Manövern zu Manöversequenzen adressiert, indem die möglichen Übergänge zwischen den

einzelnen Manövern in einem Zustandsdiagramm in Abbildung 3 veranschaulicht werden.



(a) longitudinale Manöver



(b) laterale Manöver

Abbildung 3: Zustandsdiagramm der Manöverübergänge abhängig von einer Änderung der Intention

5.3.1 Fahrstreifen halten

Dem Manöver *Fahrstreifen halten* liegt die Intention zu Grunde dem eigenen Fahrstreifen zu folgen. Dementsprechend beschreibt das Manöver *Fahrstreifen halten* das Verbleiben des Fahrzeugs im der-

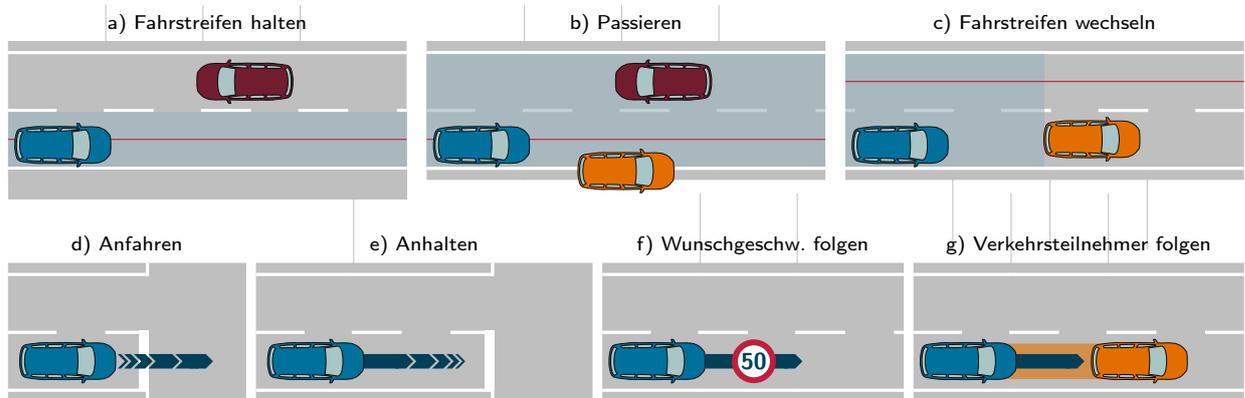


Abbildung 4: Darstellung aller Fahrmanöver mit lateralem Bezugssystem (rote Fahrstreifenmitte), lateraler Manöverzone (blau schattierter Bereich) und Intention (verschobenes Bezugssystem / blaue Blockpfeile); oben: laterale Manöver, unten longitudinale Manöver

zeitigen Fahrstreifen. Das Fahrzeug überfährt die Fahrstreifenmarkierungen nicht. Damit verlässt es den Fahrstreifen nicht, auch nicht teilweise. Wie in Abbildung 4 a) zu sehen ist das Bezugssystem dieses Manövers die Fahrstreifenmitte des eigenen Fahrstreifens. Diese kann beispielsweise in Frenetkoordinaten beschrieben werden. Da während des Manövers *Fahrstreifen halten* der eigene Fahrstreifen nicht verlassen werden soll, ist die Manöverzone auf den eigenen Fahrstreifen beschränkt. Die externe Fahrzeugbewegung kann im Rahmen eines Manövertemplates beispielsweise mithilfe der Querablage des Fahrzeuges relativ zum Bezugssystem definiert werden.

5.3.2 Fahrstreifen wechseln

Die Intention im Manöver *Fahrstreifen wechseln* ist es, vom eigenen Fahrstreifen vollständig auf einen der benachbarten Fahrstreifen zu wechseln und den eigenen Fahrstreifen vollständig zu verlassen und vollständig in den Nachbarfahrstreifen einzutreten. Das Manöver *Fahrstreifen wechseln* beschreibt das aktive Wechseln auf einen Nachbarfahrstreifen. Der eigene Fahrstreifen wird dabei vollständig verlassen. Das Manöver endet, sobald das Fahrzeug sich vollständig innerhalb des angrenzenden Fahrstreifens befindet. Dieses Manöver kann sowohl nach links als auch nach rechts stattfinden.

Wie in Abbildung 4 c) zu sehen, ist das Bezugssystem dieses Manövers die Fahrstreifenmitte des Nachbarfahrstreifens. Da während des Manövers der eigene Fahrstreifen verlassen wird, um auf den Nachbarfahrstreifen zu wechseln, umfasst die Manöverzone sowohl den eigenen Fahrstreifen als auch den Nachbarfahrstreifen. Die externe Fahrzeugbewegung kann im Rahmen eines Manövertemplates beispielsweise mithilfe eines Verlaufs der Querbeschleunigung definiert werden.

5.3.3 Passieren

Das Manöver *Passieren* unterscheidet sich vom Manöver *Fahrstreifenwechsel* insbesondere durch die Intention. Dem Manöver *Fahrstreifenwechsel* liegt die Intention zugrunde, vom eigenen Fahrstreifen vollständig auf einen der benachbarten Fahrstreifen zu wechseln. Dem Manöver *Passieren* liegt die Intention zugrunde, den eigenen Fahrstreifen soweit möglich beizubehalten und ihn nur so weit wie nötig zu verlassen. Das Manöver *Passieren* beschreibt das Umfahren eines Hindernisses, welches sich

ganz oder teilweise im eigenen Fahrstreifen befindet. Der eigene Fahrstreifen darf hierbei ganz oder teilweise verlassen werden. Ein Überholvorgang auf der Landstraße und somit das Eintreten in den Fahrstreifen des Gegenverkehrs, würde somit mithilfe des Manövers *Passieren* beschrieben werden. Ein Überholvorgang auf der Autobahn, würde hingegen mithilfe des Manövers *Fahrstreifenwechsel* beschrieben werden. Dieses Beispiel verdeutlicht die unterschiedlichen Risiken beider Manöver und ist ein starkes Argument für ihre Unterscheidung, um eine differenzierte Risikobetrachtung zu ermöglichen.

Wie in Abbildung 4 b) zu sehen, ist das Bezugssystem dieses Manövers die Fahrstreifenmitte des eigenen Fahrstreifens, obwohl der Fahrstreifen ganz oder teilweise gewechselt werden kann. Dies verdeutlicht erneut die Intention, den eigenen Fahrstreifen soweit möglich beizubehalten oder auf ihn zurückzukehren. Da während des Manövers *Passieren* der eigene Fahrstreifen, falls nötig, verlassen werden kann, umfasst die Manöverzone sowohl den eigenen Fahrstreifen als auch den Nachbarfahrstreifen. Die externe Fahrzeugbewegung kann im Rahmen eines Manövertemplates beispielsweise mithilfe der Querablage des Fahrzeuges relativ zum Bezugssystem sowie einem Verlauf der Querbeschleunigung definiert werden.

5.3.4 Anfahren

Dem Manöver *Anfahren* liegt die Intention zu Grunde, sich aus dem Stillstand in Bewegung zu setzen. Analog zu [10] beschreibt das Manöver *Anfahren* den Übergang vom Stillstand in eine Bewegung mit einer Geschwindigkeit ungleich Null. Sobald eine Bewegung mit Geschwindigkeit ungleich null erreicht ist, ist das Manöver beendet. Das Manöver kann vorwärts wie rückwärts ausgeführt bzw. betrachtet werden. Ohne weitere Spezifikation wird die Vorwärtsrichtung als Standardrichtung angesehen.

Wie bei allen longitudinalen Manövern wird das Bezugssystem durch das zeitgleich stattfindende laterale Manöver vorgegeben. Die Manöverzone des lateralen Manövers wird, wie in Abbildung 4 d) zu sehen, durch das Manöver *Anfahren* nicht weiter begrenzt. Die externe Fahrzeugbewegung kann im Rahmen eines Manövertemplates beispielsweise mithilfe eines Verlaufs der Längsbeschleunigung definiert werden.

5.3.5 Anhalten

Die dem Manöver *Anhalten* zu Grunde liegende Intention ist es an einem bestimmten Ort zum Stillstand zu kommen. Das Manöver *Anhalten* beschreibt das Verzögern bis in den Stillstand an ein Objekt, einen Verkehrsteilnehmer oder ein Infrastrukturelement wie bspw. eine Haltelinie oder einen Fußgängerüberweg. Nachdem bis in den Stillstand verzögert wurde, verbleibt das Fahrzeug so lange im Manöver *Anhalten*, bis das Manöver *Anfahren* ausgeführt wird/werden kann.

Die externe Fahrzeugbewegung kann im Rahmen eines Manövertemplates beispielsweise mithilfe eines Verlaufs der Längsbeschleunigung definiert werden.

5.3.6 Wunschgeschwindigkeit folgen

Die dem Manövers *Wunschgeschwindigkeit folgen* zu Grunde liegende Intention ist das Folgen einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit. Das Manöver *Wunschgeschwindigkeit folgen* beschreibt das Fahren

mit einer Wunschgeschwindigkeit, wenn keinem Verkehrsteilnehmer gefolgt wird. Diese Wunschgeschwindigkeit kann durch die Straßenverkehrsordnung, bspw. durch Geschwindigkeitsbegrenzungen, vorgegeben sein, sie kann aus der Infrastruktur oder dem Straßenverlauf resultieren, z.B. in Form einer reduzierten Geschwindigkeit bei engen Kurven. Die Wunschgeschwindigkeit kann zusätzlich aus den Fahrzeugfähigkeiten resultieren, die nur eine bestimmte Maximalgeschwindigkeit erlauben.

Die externe Fahrzeugbewegung kann im Rahmen eines Manövertemplates beispielsweise mithilfe (des Verlaufs) einer Sollgeschwindigkeit definiert werden.

5.3.7 Verkehrsteilnehmer folgen

Die zu Grunde liegende Intention des Manövers *Verkehrsteilnehmer folgen* ist es, einem vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer, der sich nicht notwendigerweise auf dem eigenen Fahrstreifen befinden muss, mit einem bestimmten Abstand oder einer bestimmten Zeitlücke zu folgen. Beim Manöver *Verkehrsteilnehmer folgen* passt das Ego-Fahrzeug seine longitudinale Geschwindigkeit der Geschwindigkeit eines ausgewählten Verkehrsteilnehmers in Bewegungsrichtung vor oder schräg neben dem Ego-Fahrzeug an und folgt diesem mit dessen Geschwindigkeit in einem definierten Abstand bzw. einer definierten Zeitlücke. Der Verkehrsteilnehmer, dem gefolgt werden soll, muss sich dabei nicht auf demselben Fahrstreifen wie das Ego-Fahrzeug befinden, sondern kann sich auch auf einem benachbarten Fahrstreifen befinden. Bei dem Verkehrsteilnehmer kann es sich um ein anderes Kraftfahrzeug (bspw. Pkw, Lkw, Motorrad) handeln, aber auch um eine Fahrrad fahrende oder zu Fuß gehende Person.

Wie in Abbildung 4 g) zu sehen, begrenzt das Manöver *Verkehrsteilnehmer folgen* die Manöverzone des lateralen Manövers longitudinal bis zum definierten vorausfahrenden Fahrzeug. Die externe Fahrzeugbewegung kann im Rahmen eines Manövertemplates beispielsweise mithilfe eines einzuhaltenden Abstandes definiert werden.

6 Anwendbarkeit der Terminologie

In diesem Abschnitt erfolgt auf Basis des in Abbildung 5 illustrierten Szenarios eine Überprüfung der Anwendbarkeit der in Abschnitt 4 eingeführten Terminologie sowie der in Abschnitt 5 vorgeschlagenen Manöver für die in Abschnitt 3 identifizierten Anwendungsbereiche innerhalb der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge (adressiert Anforderung A₁). Dabei wird auch geprüft ob die eingeführte Terminologie die in Abschnitt 3 spezifizierten Anforderungen erfüllt. Die Erfüllung der Anforderungen B₁ und B₂ wurde dabei bereits in Unterabschnitt 4.1 argumentiert. Anforderungen B₁ konnte dabei aufgrund der beiden gegensätzlichen Begriffsverständnisse innerhalb der Literatur nicht für die gesamte betrachtete Literatur erfüllt werden. Zudem wird eine Einordnung der in Abschnitt 4 eingeführten Terminologie in eine funktionale Systemarchitektur argumentiert.

6.1 Anwendbarkeit der Terminologie in der Fahrzeugautomatisierung

Das Beispielszenario beinhaltet ein Ego-Fahrzeug, das an einem Knotenpunkt innerhalb seiner geplanten Route links abbiegt und anschließend einer anderen Straße folgt. Die ausgeführte Manöver-

Funktionsdefinition und Sicherheitsanalyse Während der Funktionsdefinition wird unter anderem das benötigte Fahrzeugverhalten für die gewählte Einsatzumgebung spezifiziert. Dies stellt Teil der Anforderungsdefinition an die zu entwickelnde Fahrfunktion dar. Zunächst ist feststellbar, dass eine Fahrfunktion, die in einer Domäne eingesetzt wird, die das gezeigte Szenario aufweisen kann, alle der in Abschnitt 5 spezifizierten Manöver beherrschen muss. Das Fahrzeugverhalten in der Einsatzumgebung lässt sich mit den spezifizierten Manövern abstrahiert von der Bewegung des Fahrzeugs beschreiben. Da diese Manöver mindestens das innerhalb der Literatur angeführte Fahrzeugverhalten auf dieser Abstraktionsebene der Beschreibung abbilden können, siehe Unterabschnitt 5.2, ist anzunehmen, dass sich das Fahrzeugverhalten in strukturierter Umgebung mit diesen Manövern vollständig beschreiben lässt (Anforderung C3). Es lässt sich somit das Sollverhalten des Fahrzeugs mithilfe der Manöver festlegen. Durch den atomaren Charakter (Anforderung C6) der Manöver, der explizit spezifizierten Intention (Anforderung C2) sowie den Manövertemplates (Anforderung C5) ist zudem mit jedem Manöver eine klare und kommunizierbare Erwartung an die aus diesem resultierende Fahrzeugbewegung verbunden (Anforderung C3).

Im Rahmen der Sicherheitsanalyse bietet die Aufteilung der Fahrmanöver in longitudinale und laterale Manöver einige Vorteile im Gegensatz zu einer kombinierten Definition. Wie in Abschnitt 3 angeführt wird in der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung das Sollverhalten in einem Szenario definiert. Durch Abweichungen vom Sollverhalten können Gefährdungen entstehen. Durch die Aufteilung der Manöver zur Beschreibung des Sollverhaltens in einen lateralen und einen longitudinalen Anteil kann unterschieden werden welcher Aspekt des Verhaltens zu einer Gefährdung führt. So können auch die aus der Sicherheitsanalyse resultierenden Sicherheitsziele präziser für den lateralen und longitudinalen Anteil des Verhaltens spezifiziert werden.

Die spezifizierten Fahrmanöver eignen sich somit nach dieser Betrachtungsweise sowohl für die Anwendung in der Funktionsdefinition als auch in der Sicherheitsanalyse.

Selbstwahrnehmung Wie in Unterabschnitt 3.1 angeführt bietet die Selbstwahrnehmung eine Grundlage, das Verhalten des Fahrzeugs zur Laufzeit zu überwachen und zu erkennen, ob die aktuellen Fähigkeiten des Systems ausreichen, um sicheres Verhalten zu realisieren.

Sowohl während der Entwicklung, als auch zur Systemlaufzeit leisten atomare Manöver einen Beitrag zur Strukturierung des zu überwachenden Fahrzeugverhaltens. Durch den atomaren Charakter der Manöver (Anforderung C6), lassen sich zur Strukturierung des Fahrzeugverhaltens eindeutige Zuordnungen von Systemfähigkeiten zu gewünschtem Verhalten und somit zu den durchzuführenden Manövern treffen [10]. Bei einer nicht atomaren Definition von Fahrmanövern wären Inkonsistenzen zwischen den Manövern möglich, deren Eigenschaften sich überschneiden. Eine eindeutige Zuordnung von Systemfähigkeiten zum Fahrzeugverhalten wäre damit nicht in jedem Fall gegeben.

Mit den hier definierten Manövern ist nach den Ausführungen in Unterabschnitt 5.2 eine (in Bezug auf die bekannte Literatur vollständige) Beschreibung des Fahrzeugverhaltens auf taktischer Ebene für eine strukturierte Umgebung möglich (Anforderung C1). Somit können aus den spezifizierten Manövern die direkt für das Fahrzeugverhalten benötigten Fähigkeiten abgeleitet werden. Diese Menge an Fähigkeiten ergibt sich aus den für ein Manöver grundsätzlich benötigten Fähigkeiten, welche sich aus den Manöverbeschreibungen und den Manöverzonen ableiten lassen. Zusätzlich benötigte Fähigkeiten ergeben sich aus der konkreten Einsatzumgebung und den dort vorkommenden Szenenelementen [68].

Verhaltensentscheidung und Verhaltensgenerierung Wie in Unterabschnitt 3.1 beschrieben gibt es bei der Realisierung dieser Verhaltensentscheidung die Möglichkeit zwischen verschiedenen Abstraktionsebenen des Verhaltens zu unterscheiden. Manöver stellen dabei eine mögliche Abstraktionsebene dar. Der atomare Charakter der in diesem Beitrag vorgeschlagenen Manöver (Anforderung C6) stellt sicher, dass mit jedem Manöver eine eindeutige Handlung verbunden ist. Die Auswahl eines Verhaltens und damit auch eines Manövers geschieht immer bzgl. des Erreichens eines übergeordneten Ziels. Diesem Ziel liegt somit eine Intention zu Grunde. Die Verhaltensentscheidung kann eine Manöverauswahl so treffen, dass die gewählten Manöver mit der ihnen zugrundeliegenden Intention (Anforderung C2) zum Erreichen des übergeordneten Ziels beitragen.

Abschließend bieten sich die definierten Ergänzungen zu den Manövern in Form von Manöverzonen und Referenzsystemen als Schnittstellen zu Trajektoriengenerierungs- und -regelungsalgorithmen an (Anforderung C4). Die taktischen Entscheidungen über Manöver legen in diesem Fall den Aktionsraum fest, in dem eine Trajektorie generiert und eingeregelt werden darf. Die konkrete geometrische Ausgestaltung der Manöverzonen liefert geometrische Beschränkungen für diesen Aktionsraum. Die Definition von eindeutigen Bezugssystemen für Manöver ermöglicht die Formulierung von eindeutigen Gütekriterien zur Bewertung und (optimierungsbasierten) Auswahl von Trajektorien zu einer Entscheidung.

Die in diesem Beitrag vorgeschlagenen Manöver und zugehörigen Beschreibungen über zugrundeliegende Intention und Bezugssystem eignen sich somit für eine manöverbasierte Verhaltensentscheidung. Sie bieten zudem die Möglichkeit über die Manöverzonen Randbedingungen an eine Trajektoriengenerierung zu kommunizieren.

Verhaltensprädiktion Wie in Unterabschnitt 3.1 aufgeführt, müssen Fahrzeugbewegungen auf verschiedenen Abstraktionsebenen mit der in Abschnitt 4 vorgestellten Terminologie beschrieben werden können, damit die hier vorgeschlagene Strukturierung der Manöver für die Anwendung in der Prädiktion geeignet ist. Für eine vorausschauende Fahrweise und Bewegungsplanung eines automatisierten Fahrzeugs bedarf es zukünftige Bewegungsschätzungen anderer Verkehrsteilnehmer über einen längeren Zeitraum. Die Erkennung des Manövers und der zugrundeliegenden Intention liefert die Möglichkeit, das Verhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers auf Fahrstreifenebene auch über mehrere Sekunden zu schätzen und damit frühzeitig auf dieses zu reagieren (Anforderung C1 und C3) [54]. Auf der Beschreibungsebene der Erkennung von Missionselementen, die über Manöversequenzen darstellen lassen, existieren Ansätze zur Vorhersage von Abbiegevorgängen an Kreuzungen. Dabei lässt sich ein Abbiegevorgang aus Abschnitten kürzerer Dauer zusammensetzen, wie Bremsen, langsam Fahren, Anhalten, Anfahren und Abbiegen [69, 70]. Die hier vorgeschlagenen Manöverprimitive beschreiben die einzelnen Abschnitte des Abbiegevorgangs und lassen sich aufgrund der eindeutigen Zuordnung zu Manövern in diese überführen. Ansätze zur Verhaltensprädiktion, die darauf abzielen ein- oder ausscherende Fahrzeuge zu identifizieren, beschränken sich häufig auf die Unterscheidung der Manöver Fahrstreifen wechseln und Fahrstreifen folgen [71]. Dies zeigt die Anwendbarkeit der definierten Fahrmanöver auf bereits bestehende Begriffsverständnisse.

In Bezug auf die analysierte Literatur und die erhobenen Anforderungen an den Manöverbegriff leistet die vorgeschlagene Strukturierung des Fahrverhaltens und die vorgeschlagene Begriffsdefinition einen Beitrag im Anwendungsbereich der Verhaltensprädiktion. Mithilfe der Beschreibung der Fahrzeugbewegung auf mehreren Abstraktionsebenen kann innerhalb einer ebenfalls mehrstufig

strukturierten Verhaltensprädiktion das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer geschätzt und beschrieben werden. Aufgrund der von außen nur bedingt beobachtbaren Intention bleibt trotz des atomaren Charakters (Anforderung C6) der vorgeschlagenen Manöver eine Unsicherheit bei der Erkennung von Manövern anderer Verkehrsteilnehmer bestehen.

Simulation & Test Für das simulationsbasierte Entwickeln und Testen (Verifikation & Validierung) eines Systems müssen unter anderem die durchzuführenden Szenarien definiert werden. In jedem Szenario sind nach Bagschik u. a. [63] neben der Straßeninfrastruktur und den Umweltbedingungen auch die Verhaltensweisen der vorhandenen Verkehrsteilnehmer zu spezifizieren. Dieses (externe) Verhalten kann für jeden Verkehrsteilnehmer mithilfe von Manövern beziehungsweise Manöversequenzen beschrieben werden.

Damit die in diesem Beitrag vorgeschlagenen Manöver in diesem Rahmen anwendbar sind, muss aus jedem Manöver ein eindeutiges externes Verhalten für den Verkehrsteilnehmer, der das Manöver ausführt, resultieren. Hierzu werden zu jedem Manöver, wie in Abschnitt 5 beschrieben, ein oder mehrere Manövertemplates definiert (Anforderung C5). Jedes Manövertemplate beschreibt das externe Verhalten des Fahrzeugs, das das Manöver ausführt, mithilfe spezifizierter Parameter und stellt so ein eindeutiges Verhalten des entsprechenden Verkehrsteilnehmers in der Simulation sicher (Anforderung C3).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Abbildbarkeit der vorgeschlagenen Manöver auf maschinenlesbare Datenformate zur Szenarienbeschreibung. Eine mögliche Beschreibungssprache für Szenarien mit dem Fokus auf einer simulativen Szenariendurchführung ist das Format OpenSCENARIO⁵. Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung verwendet OpenSCENARIO 1.0 unter anderem sogenannte „Private Actions“ sowie verschiedene „Follow Trajectory Actions“. Die „Private Actions“ sind analog zu den vorgeschlagenen Manövern in die Kategorien „Longitudinal Actions“ und „Lateral Actions“ unterteilt. Die in diesem Beitrag vorgeschlagenen Manöver lassen sich mithilfe dieser Aktionen in OpenSCENARIO umsetzen und sind somit in der Simulation abbildbar. Die vorgeschlagenen Manöver eignen sich somit für die Definition von Szenarien im Rahmen eines simulationsgestützten Testprozesses.

6.2 Architekturbetrachtungen zum Manöverbegriff

Ein wichtiges Mittel zur Beherrschung komplexer Systeme ist die Definition von funktionalen und/oder logischen Systemarchitekturen [47, 65, 72, 73]. Diese Architekturen stellen implementierungsunabhängige Beschreibungen von Teilsystemen mit ihren Eingangs- und Ausgangsschnittstellen dar. Basierend auf Arbeiten von Michon [30] und Donges [31] hat sich mittlerweile die Organisation der menschlichen Fahraufgabe in strategischen, taktischen und reaktiven bzw. Stabilisierungsfunktionen auch für automatisierte Fahrzeuge etabliert [15, 65, 73].

Typisch für hierarchische Architekturen macht die jeweils übergeordnete Architekturebene Vorgaben für eine untergeordnete Ebene, überlässt der unteren Ebene aber Spielraum, wie genau eine Vorgabe umgesetzt wird.

Bei Betrachtung der grundsätzlichen Verteilung der Aufgaben zwischen Navigations-, Führungs- und Stabilisierungsebene werden häufig zeitlich-, räumliche Unterteilungen angeführt [65] (siehe

⁵<https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/>, abgerufen am 14.09.2020

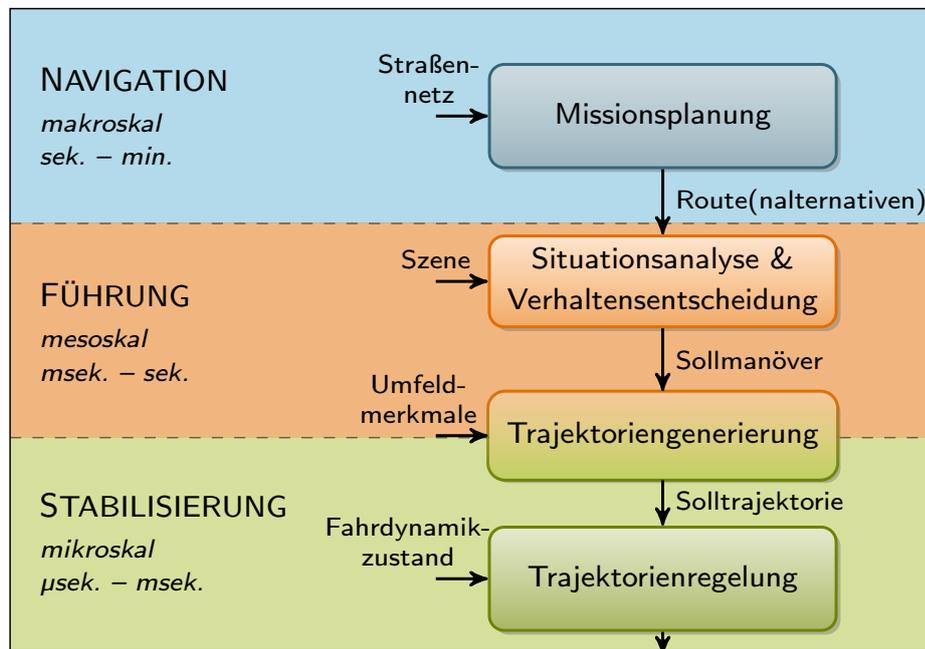


Abbildung 6: Vereinfachter Ausschnitt einer funktionalen Systemarchitektur nach Ulbrich u. a. [73] oder Lotz [15]: Darstellung hierarchischer Ebenen nach Donges [31]. Zuordnung der Trajektorienplanung/-generierung zu den Ebenen unterscheidet sich in [73] und [15].

Abbildung 6). Lotz [15] argumentiert zusätzlich, auch unter Nutzung des Manöverbegriffs, die anforderungsbasierte Verteilung der Funktionalitäten auf den drei Hierarchieebenen. Dabei argumentiert er im Sinne einer möglichst eindeutigen Trennung von Verantwortlichkeiten („separation of concerns“) sowie der Prinzipien der losen Kopplung („loose cohesion“) und Wiederverwendbarkeit funktionaler Module und damit auch der Unabhängigkeit der Architekturebenen.

Über die Granularität funktionaler Blöcke und deren Zuordnung zu den Hierarchieebenen existiert trotz der Vorarbeiten von Lotz [15] und Matthaei [74] bzw. Ulbrich u. a. [73] kein eindeutiger Konsens. Vor allem im Hinblick auf die Umsetzung der Fahraufgabe durch Navigation, Entscheidungsfindung und Trajektorienplanung bzw. -generierung (im Folgenden nach Matthaei und Maurer [65] nur noch Trajektoriengenerierung) gibt es verschiedene Auffassungen über die konkrete Aufteilung in funktionale Module und deren Zuordnung zur taktischen oder zur Stabilisierungsebene.

Während die Zuordnung der Trajektoriengenerierung zur taktischen und Stabilisierungsebene bereits zwischen [73, 74] einerseits und [15] andererseits abweicht⁶, existiert in beiden Architekturen eine eindeutige Trennung zwischen Verhaltensentscheidung und Trajektoriengenerierung. Gleichzeitig werden in der Literatur integrierte Ansätze verfolgt [58], die keine klare Trennung auf funktionaler Ebene vornehmen. Jedoch lassen sich aus Gründen der architektonischen Anforderungen [15], der Nachverfolgbarkeit von Systemhandlungen [75] und dem Umgang mit Unsicherheiten [75] eine Reihe von Argumenten für eine Trennung beider Blöcke finden.

Sowohl in [15] als auch in [65, 73] stellt ein gewünschtes Manöver eine geeignete Schnittstelle zwischen beiden Systemteilen dar, da eine diskrete Entscheidung (d.h. die Generierung einer Intention

⁶Bei Ulbrich u. a. [73] und Matthaei [74] ist die Trajektoriengenerierung Teil der Stabilisierungsebene. Lotz [15] sieht sie auf der Führungsebene, ist in der Argumentation allerdings nicht überall vollständig konsistent.

des automatisierten Fahrzeugs) in eine Sequenz von fahrdynamischen Zuständen übersetzt werden muss.

Die vorangegangenen Ausführungen adressieren Anforderungen C1 und C2.

6.3 Fazit

Für alle betrachteten Anwendungsbereiche wurde die Anwendbarkeit der Begriffsdefinition und der definierten Manöver argumentiert (Anforderung A1). Zudem werden alle für den jeweiligen Anwendungsbereich in Abschnitt 3 identifizierten Anforderungen durch die definierten Manöver und die erweiterte Terminologie adressiert. Nach den vorangegangenen Ausführungen sind Begriffsdefinition und definierte Manöver somit für alle betrachteten Anwendungsbereiche geeignet. Zusätzlich wurde eine Einordnung der vorgeschlagenen Terminologie in eine funktionale Systemarchitektur argumentiert. Hiernach ist die vorgeschlagene Definition des Manöverbegriffs für eine Beschreibung des Fahrzeugverhaltens auf taktischer Ebene nach Donges [31] geeignet (Anforderungen C1 und C2).

7 Zusammenfassung

Für die Entwicklung komplexer Systeme, wie automatisierten Fahrzeugen wird ein einheitliches Vokabular benötigt. Um zu diesem Vokabular beizutragen wurde im Rahmen dieses Beitrags eine Definition des Begriffs *Fahrmanöver* vorgeschlagen. Zudem wurde ein Satz an Fahrmanövern und begleitende Terminologie für die Beschreibung des Verhaltens ein automatisiertes Straßenfahrzeug präsentiert. Sowohl die Begriffsdefinition und begleitende Terminologie als auch die definierten Manöver sind mit der betrachteten Literatur kompatibel oder weitgehend kompatibel. Beides lässt sich zudem in den identifizierten Anwendungsgebieten der Fahrzeugautomatisierung anwenden und erfüllt aus diesen Gebieten resultierende Anforderungen.

Eine Definition eines zentralen Begriffs für die Fahrzeugautomatisierung, wie dem Fahrmanöverbegriffs sollte idealerweise allerdings von Standardisierungs- und Normierungsgremien aufgegriffen und festgelegt werden. Dieses Papier stellt somit nur einen Beitrag zu aktuellen Standardisierungsbestrebungen dar.

Danksagung

Diese Forschungsarbeiten wurden zum Teil im Rahmen des Projekts „UNICARagil“ durchgeführt (FKZ 16EMO0285). Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung des Projekts durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Wir bedanken uns zudem bei unseren Kollegen Jan Timo Wendler und Felix Grün für die anregenden Diskussionen, sowie bei Christian Lalitsch-Schneider für das „Ausprobieren“ der vorgestellten Manöver und viel hilfreiches Feedback.

Literatur

- [1] A. J. McKnight und B. B. Adams. *Driver Education Task Analysis. Volume 1: Task Descriptions*. Final Report Contract No FH 11-7336. Alexandria, VA, USA: Human Resources Research Organization, 1970.
- [2] W. Fastenmeier und H. Gstalter. „Driving Task Analysis as a Tool in Traffic Safety Research and Practice“. In: *Safety Science* 45.9 (2007).
- [3] G. Reichart. *Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001.
- [4] A. R. Hale, J. Stoop und J. Hommels. „Human Error Models as Predictors of Accident Scenarios for Designers in Road Transport Systems“. In: *Ergonomics* 33.10-11 (1990).
- [5] K. Fujita, Y. Kagawa, J. Satonobu und A. Okuno. „A Knowledge-Based System for Autonomous Highway Cruising“. In: *Proceedings of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation*. Kyoto, Japan, 1990.
- [6] U. Özgüner, O. Hatipoglu und K. Redmill. „Autonomy in a Restricted World“. In: *Proceedings of Conference on Intelligent Transportation Systems*. Boston, MA, USA, 1997.
- [7] H.-H. Nagel und W. Enkelmann. „Generic Road Traffic Situations and Driver Support Systems.“ In: *Proceedings of the 5th PROMETHEUS Workshop*. München, 1991.
- [8] R. Bajcsy und H.-H. Nagel. „Descriptive and Prescriptive Languages for Mobility Tasks: Are They Different?“ In: *Advances in Image Understanding*. Hrsg. von K. Bowyer. Los Alamitos, CA, USA, 1996.
- [9] W. Tölle. *Ein Fahrmanöverkonzept für einen menschlichen Kopiloten*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- [10] A. Reschka. „Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung“. Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2017.
- [11] K.-H. Siedersberger. „Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen“. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 2003.
- [12] J. Schröder, M. Hoffmann, M. Zöllner und R. Dillmann. „Behavior Decision and Path Planning for Cognitive Vehicles Using Behavior Networks“. In: *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Istanbul, Türkei, 2007.
- [13] M. Schreiber, M. Kauer, D. Schlesinger, S. Hakuli und R. Bruder. „Verification of a Maneuver Catalog for a Maneuver-Based Vehicle Guidance System“. In: *2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Miyazaki, Japan, 2010.
- [14] M. Schreiber. „Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer manöverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [15] F. Lotz. „Eine Referenzarchitektur für die assistierte und automatisierte Fahrzeugführung mit Fahrereinbindung“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2017.

- [16] K. Czarnecki. „Automated Driving System (ADS) Task Analysis - Part 2: Structured Road Maneuvers“. In: *Waterloo Intelligent Systems Engineering Lab (WISE) Report, University of Waterloo, Canada* (2018).
- [17] A. J. Barbera, J. A. Horst, C. I. Schlenoff und D. W. Aha. „Task Analysis of Autonomous On-Road Driving“. In: *Mobile Robots XVII*. Hrsg. von D. W. Gage. Bd. 5609. Philadelphia, PA, USA: International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [18] A. Hermann und J. Desel. „Driving Situation Analysis in Automotive Environment“. In: *2008 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*. Columbus, OH, USA, 2008.
- [19] L. Hartjen, R. Phillip, F. Schuldt, F. Howar und B. Friedrich. „Classification of Driving Maneuvers in Urban Traffic for Parametrization of Test Scenarios“. In: *9. Tagung Automatisiertes Fahren*. München, 2019.
- [20] J. Kramer. „Kollektive Energieeffizienz auf mehrspurigen Straßen“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2018.
- [21] M. Vollrath, C. Schießl, T. Altmüller, M. Dambier und C. Kornblum. „Erkennung von Fahrmanövern als Indikator für die Belastung des Fahrers“. In: *VDI-Berichte 1919* (2005).
- [22] E. Thorn, S. Kimmel und M. Chaka. *A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios*. Technical Report DOT HS 812 623. Washington, D.C., USA: National Highway Traffic Safety Administration, 2018.
- [23] G. Bagschik, T. Menzel, C. Körner und M. Maurer. „Wissensbasierte Szenariengenerierung für Betriebsszenarien auf deutschen Autobahnen“. In: *12. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting: Uni-DAS e.V., 2018.
- [24] M. Gyllenhammar, C. Zandén und M. Törngren. „Defining Fundamental Vehicle Actions for the Development of Automated Driving Systems“. In: *WCX SAE World Congress Experience*. 2020.
- [25] J. Klimke, D. Becker und L. Eckstein. „System Design of an Agent Model for the Closed-Loop Simulation of Relevant Scenarios in the Development of ADS“. In: *29th Aachen Colloquium*. Aachen, 2020.
- [26] P. Koopman und M. Wagner. „Autonomous Vehicle Safety: An Interdisciplinary Challenge“. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 9.1 (2017).
- [27] G. Bagschik, T. Menzel, A. Reschka und M. Maurer. „Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen“. In: *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting: Uni-DAS e.V., 2017.
- [28] Waymo. *On the Road to Fully Self-Driving*. Techn. Ber. Mountain View: Waymo, 2017.
- [29] M. Nolte, G. Bagschik, I. Jatzkowski, T. Stolte, A. Reschka und M. Maurer. „Towards a Skill- and Ability-Based Development Process for Self-Aware Automated Road Vehicles“. In: *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Yokohama, Japan, 2017.
- [30] J. A. Michon. „A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do?“ In: *Human Behavior and Traffic Safety*. Hrsg. von L. Evans und R. C. Schwing. Boston, MA, USA: Springer US, 1985.
- [31] E. Donges. „Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen“. In: *Automobil-Industrie* 27.2 (1982).

- [32] M. Schreiber, M. Kauer und R. Bruder. „Conduct by Wire - Maneuver Catalog for Semi-Autonomous Vehicle Guidance“. In: 2009 *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Xi'an, Shaanxi, China, 2009.
- [33] E. D. Dickmanns. *Dynamic Vision for Perception and Control of Motion*. London: Springer, 2007.
- [34] E. D. Dickmanns. „Maneuvers as Knowledge Elements for Vision and Control“. In: *9th International Workshop on Robot Motion and Control*. Wonsowo, Polen, 2013.
- [35] C. Sippl, F. Bock, C. Lauer, A. Heinz, T. Neumayer und R. German. „Scenario-Based Systems Engineering: An Approach Towards Automated Driving Function Development“. In: 2019 *IEEE International Systems Conference (SysCon)*. Orlando, FL, USA, 2019.
- [36] B. Franz. „Entwicklung und Evaluation eines Interaktionskonzepts zur manöverbasierten Führung von Fahrzeugen“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [37] D. ISO. 13643-1: *Manövrieren von Schiffen – Teil 1: Allgemeine Begriffe, Größen und Versuchsbedingungen*. 2018.
- [38] M. Pellkofer. „Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung“. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 2003.
- [39] H. Schneider. „Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme“. Dissertation. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2009.
- [40] J. Bach, S. Otten und E. Sax. „Model Based Scenario Specification for Development and Test of Automated Driving Functions“. In: 2016 *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Göteborg, Schweden, 2016.
- [41] M. Mauritz. „Engineering of Safe Autonomous Vehicles through Seamless Integration of SystemDevelopment and SystemOperation“. Dissertation. Clausthal: Technische Universität Clausthal, 2019.
- [42] SAE. *J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*. Standard. 2018.
- [43] C. Nowakowski, S. E. Shladover, C.-Y. Chan und H.-S. Tan. „Development of California Regulations to Govern Testing and Operation of Automated Driving Systems“. In: *Transportation Research Record* 2489.1 (2015).
- [44] NHTSA. *Federal Automated Vehicles Policy - Accelerating the Next Revolution In Roadway Safety*. Techn. Ber. 2016.
- [45] H.-H. Nagel. „A Vision of 'Vision and Language' Comprises Action: An Example from Road Traffic“. In: *Artificial Intelligence Review* 8.(2-3) (1994).
- [46] A. Okuno, K. Fujita und A. Kutami. „Visual Navigation of an Autonomous On-Road Vehicle: Autonomous Cruising on Highways“. In: *Vision-Based Vehicle Guidance*. Hrsg. von I. Masaki. Springer Series in Perception Engineering. New York, NY: Springer New York, 1992.
- [47] M. Maurer. „Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen“. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 2000.

- [48] J. Schröder. „Adaptive Verhaltensentscheidung und Bahnplanung für kognitive Automobile“. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2009.
- [49] C. Bauer. „A Driver-Specific Maneuver Prediction Model Based on Fuzzy Logic“. Dissertation. Berlin: Freie Universität Berlin, 2011.
- [50] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt und M. Maurer. „Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren“. In: 10. *Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Walting: Uni-DAS e.V., 2015.
- [51] ISO. *26262: Road Vehicles — Functional Safety*. Standard. ISO, 2018.
- [52] R. Graubohm, T. Stolte, G. Bagschik, A. Reschka und M. Maurer. „Systematic Design of Automated Driving Functions Considering Functional Safety Aspects“. In: 8. *Tagung Fahrerassistenz*. München, 2017.
- [53] M. Nolte, I. Jatzkowski, S. Ernst und M. Maurer. „Supporting Safe Decision Making Through Holistic System-Level Representations & Monitoring – A Summary and Taxonomy of Self-Representation Concepts for Automated Vehicles“. In: *arXiv:2007.13807 [cs, eess]* (2020). arXiv: 2007.13807 [cs, eess].
- [54] S. Lefèvre, D. Vasquez und C. Laugier. „A Survey on Motion Prediction and Risk Assessment for Intelligent Vehicles“. In: *ROBOMECH Journal* 1.1 (2014).
- [55] G. Bagschik, A. Reschka, T. Stolte und M. Maurer. „Identification of Potential Hazardous Events for an Unmanned Protective Vehicle“. In: *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Göteborg, Sweden: IEEE, 2016.
- [56] A. Reschka, G. Bagschik, S. Ulbrich, M. Nolte und M. Maurer. „Ability and Skill Graphs for System Modeling, Online Monitoring, and Decision Support for Vehicle Guidance Systems“. In: *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Seoul, Südkorea, 2015.
- [57] S. Ulbrich. „Towards Tactical Lane Change Behavior Planning for Automated Vehicles“. In: *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Gran Canaria, Spanien, 2015.
- [58] P. F. Orzechowski, C. Burger, M. Lauer und C. Stiller. „Verhaltensentscheidung für automatisierte Fahrzeuge mittels Arbitrationsgraphen“. In: *at - Automatisierungstechnik* 69.2 (2021).
- [59] J. Du, J. Masters und M. Barth. „Lane-Level Positioning for in-Vehicle Navigation and Automated Vehicle Location (AVL) Systems“. In: *Proceedings. The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE Cat. No.04TH8749)*. 2004.
- [60] S. Ernst, J. Rieken und M. Maurer. „Behaviour Recognition of Traffic Participants by Using Manoeuvre Primitives for Automated Vehicles in Urban Traffic“. In: *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Rio de Janeiro, Brasilien, 2016.
- [61] M. Althoff, O. Stursberg und M. Buss. „Model-Based Probabilistic Collision Detection in Autonomous Driving“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10.2 (2009).
- [62] PEGASUS Project Office. *Pegasus Method*. <https://www.pegasusprojekt.de/en/pegasus-method>.
- [63] 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, China, 2018.

- [64] Bundesministerium für Verkehr. *Straßenverkehrsordnung (StVO)*. Techn. Ber. 03/2013. 2013.
- [65] R. Matthaei und M. Maurer. „Autonomous Driving – a Top-down-Approach“. In: *at - Automatisierungstechnik* (2015).
- [66] R. Gregor. „Fähigkeiten zur Missionsdurchführung und Landmarkennavigation“. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 2002.
- [67] F. Schuldt, R. Phillip und T. Menzel. „Erkennung von Basismanövern auf Autobahnen aus Messdaten zur Erstellung von Szenarien und Testfällen für den Absicherungsprozess“. In: *34. VDI/VW Gemeinschaftstagung Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren 2018*. Wolfsburg, 2018.
- [68] I. Jatzkowski, T. Menzel und M. Maurer. „A Knowledge-Based Approach for the Automatic Construction of Skill Graphs for Online Monitoring“. In: *arXiv:2102.08827 [cs, eess]* (2021). arXiv: 2102.08827 [cs, eess].
- [69] T. Hülnhagen, I. Dengler, A. Tamke, T. Dang und G. Breuel. „Maneuver Recognition Using Probabilistic Finite-State Machines and Fuzzy Logic“. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. La Jolla, CA, USA, 2010.
- [70] M. Bahram, A. Wolf, M. Aeberhard und D. Wollherr. „A Prediction-Based Reactive Driving Strategy for Highly Automated Driving Function on Freeways“. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*. Dearborn, MI, USA, 2014.
- [71] J. Schlechtriemen, A. Wedel, J. Hillenbrand, G. Breuel und K.-D. Kuhnert. „A Lane Change Detection Approach Using Feature Ranking with Maximized Predictive Power“. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Dearborn, MI, USA, 2014.
- [72] S. Behere und M. Törngren. „A Functional Reference Architecture for Autonomous Driving“. In: *Information and Software Technology* 73 (2016).
- [73] S. Ulbrich, A. Reschka, J. Rieken, S. Ernst, G. Bagschik, F. Dierkes, M. Nolte und M. Maurer. „Towards a Functional System Architecture for Automated Vehicles“. In: *arXiv preprint arXiv:1703.08557* (2017). arXiv: 1703.08557.
- [74] R. Matthaei. „Wahrnehmungsgestützte Lokalisierung in fahrstreifengenauen Karten für Assistenzsysteme und automatisches Fahren in urbaner Umgebung“. Dissertation. TU Braunschweig, 2015.
- [75] M. Nolte, S. Ernst, J. Richelmann und M. Maurer. „Representing the Unknown – Impact of Uncertainty on the Interaction between Decision Making and Trajectory Generation“. In: *IEEE 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Maui, HI, 2018.