

Systemarchitektur und Fahrmanöver zum sicheren Anhalten modularer automatisierter Fahrzeuge

Stefan Ackermann* und Hermann Winner†

Zusammenfassung: Maschinelle Systeme übernehmen einen immer größer werdenden Anteil der dynamischen Fahraufgabe automatisierter Fahrzeuge. Funktionale Degradationen können die Fähigkeiten dieser Systeme negativ beeinflussen, sodass sie die Fahraufgabe nicht weiter erfüllen können. In diesen Fällen wird bei höher automatisierten Systemen die Fahraufgabe von einer maschinellen Rückfallebene übernommen. Im Rahmen des Forschungsprojekts UNICAR*agil* wird eine modulare und dienstbasierte funktionale Fahrzeugarchitektur entwickelt, für die in diesem Beitrag die Anforderungen und die Systemarchitektur einer geeigneten funktionalen Rückfallebene vorgestellt werden und der weitere Forschungsbedarf hinsichtlich der erforderlichen Fähigkeiten der Teilfunktionen, ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten und der Absicherung der Teil- und Gesamtfunktionen erläutert wird.

Schlüsselwörter: Automatisiertes Fahren, Risikominimaler Zustand, Sicheres Anhalten, UNICAR*agil*

1 Einleitung

Die technische Entwicklung intelligenter Transportsysteme führt zu automatisierten Fahrfunktionen, die einen immer größer werdenden Anteil der dynamischen Fahraufgabe übernehmen. Doch was passiert, wenn die Fähigkeiten dieser Fahrfunktionen durch funktionale Degradationen nicht mehr für die Erfüllung der Fahraufgabe ausreichen? Nach SAE Norm J3016 [1] werden für höher automatisierte Fahrzeuge (SAE Level 3 und höher) maschinelle Systeme als Rückfallebene der primären Fahrfunktionen vorausgesetzt. Auch vonseiten der Gesetzgebung zeichnen sich Forderungen nach entsprechenden Rückfalllösungen ab [2]. Für Fahrzeuge mit SAE Level 3 wird beispielsweise das ECE-Homologationsverfahren [3] von der UNECE-Arbeitsgruppe “Automatically Commanded Steering Function“ (ACSF) [4] überarbeitet.

Im Projekt UNICAR*agil* [5] wird die modulare und dienstbasierte Softwarearchitektur “Automotive Service-Oriented Software Architecture“ (ASOA) zur Erfüllung der Fahrfunktionen eines automatisierten Fahrzeugs entwickelt. Dieser Ansatz ermöglicht die Aufteilung der funktionalen Architektur in separate Dienste. Für diese, im Kontext der Fahrzeugautomatisierung neuartige, modulare und dienstbasierte Softwarearchitektur werden in diesem Beitrag die Anforderungen und die davon abgeleitete Systemarchitektur ei-

*Stefan Ackermann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt, (E-Mail: ackermann@fzd.tu-darmstadt.de).

†Hermann Winner ist Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Otto-Berndt-Str. 2, 64287 Darmstadt (E-Mail: winner@fzd.tu-darmstadt.de).

ner geeigneten funktionalen Rückfallebene “Sicheres Anhalten“ vorgestellt, die bisherigen Erkenntnisse darüber zusammengefasst und der weitere Forschungsbedarf erläutert.

1.1 “Sicheres Anhalten“

Die Bezeichnung “Sicheres Anhalten“ wurde im Projekt “Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen“ (aFAS) [6] für die Benennung eines Betriebszustands verwendet. In der Dissertation von Reschka [7] wird die Bezeichnung dagegen für ein Fahrmanöver genutzt. Im Rahmen dieses Beitrags wird die maschinelle Rückfallebene der Fahrfunktionen eines automatisierten Fahrzeugs “Sicheres Anhalten“ (engl.: Safe Halt) genannt.

1.2 Das Forschungsprojekt UNICAR*agil*

Für das Gemeinschaftsprojekt UNICAR*agil* [5] hat sich ein Konsortium aus acht deutschen Universitäten und mehreren Industriepartnern gebildet. Ziel des Projekts ist die Erforschung einer disruptiven modularen Architektur für vielfältige, agile und vollautomatisierte Fahrzeugkonzepte. Die Modularität erstreckt sich hierbei sowohl über die Hardware als auch die Software-Architektur. Entwickelt werden agile Fahrplattformen mit integrierten Dynamikmodulen, die Antriebs-, Brems- und Lenkfunktion kombinieren. Im Verlauf des Projekts werden vier prototypische vollautomatisierte Fahrzeugausprägungen aufgebaut.

1.3 Struktur des Beitrags

Die Struktur dieses Beitrags gliedert sich in fünf Kapitel. In Kapitel 2 wird die Hardwarearchitektur des automatisierten Fahrzeugs im Projekt UNICAR*agil* vorgestellt. In Kapitel 3 werden Anforderungen an eine dienstbasierte maschinelle Rückfallebene formuliert. Eine von diesen Anforderungen abgeleitete Systemarchitektur und ihre Einzelfunktionen werden in Kapitel 4 vorgestellt. In Kapitel 5 wird schließlich der Erkenntnisstand zusammengefasst und ein Ausblick auf die zukünftige Forschungsarbeit gegeben.

2 Hardwarearchitektur im Projekt UNICAR*agil*

Die Hardwarearchitektur des automatisierten Fahrzeugs im Projekts UNICAR*agil* [5] ist in die drei Ebenen Großhirn, Stammhirn und Rückenmark gegliedert, von denen das Stammhirn und das Rückenmark ausfallsicher (Fail-Operational) gestaltet sind [8]. Die Bezeichnung der Ebenen orientiert sich an den jeweiligen Entsprechungen im menschlichen Körper. Jedes Steuergerät im Fahrzeug ist einer dieser Hardwareebenen zugeordnet. Abbildung 1 zeigt das Konzept der Hardwarearchitektur des automatisierten Fahrzeugs im Projekt UNICAR*agil*. Das Großhirn übernimmt die Aufgaben der Umfeldwahrnehmung und der Verhaltens-, Manöver- und Trajektorienplanung. Zur Umfeldwahrnehmung sind vier Sensormodule an den Fahrzeugecken angebracht. Jedes dieser Sensormodule erzeugt mithilfe von Lidar, Radar sowie Kameras Umfeldinformationen, die im Großhirn zu einem Umfeldmodell fusioniert werden. Basierend auf diesem Umfeldmodell und Informationen

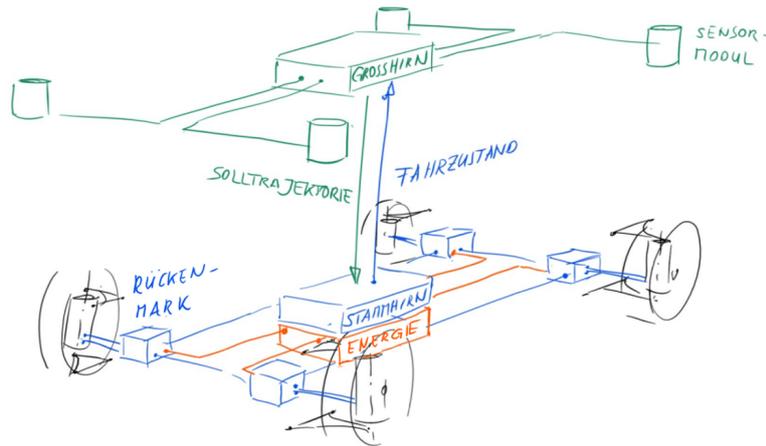


Abbildung 1: Skizze der Hardwarearchitektur des automatisierten Fahrzeugs im Projekt UNICAR*agil* [5]

aus einer digitalen Karte wird eine Solltrajektorie geplant und an die Ebene des Stammhirns übertragen.

Eine der Aufgaben des Stammhirns ist die Bewegungsregelung des Fahrzeugs. Der hierfür benötigte Fahrdynamikzustand wird durch eine mit dem Stammhirn verbundene Fahrdynamikzustandsschätzung erfasst. Die Bewegungsregelung vergleicht diesen Fahrdynamikzustand mit dem durch die Solltrajektorie beschriebenen Sollzustand und erzeugt entsprechende Stellgrößen für die Fahrzeugaktorik. Die Solltrajektorie wird dabei nur bei einer Änderung des dynamischen Umfelds, nicht aber bei einer Regelabweichung angepasst. Zusätzlich zur Bewegungsregelung ist dem Stammhirn die funktionale Rückfallebene "Sicheres Anhalten" zugeordnet. Mithilfe dieser Rückfallebene wird gewährleistet, dass das automatisierte Fahrzeug jederzeit in einen risikominimalen Zustand überführt werden kann. Die Rückfallebene erzeugt hierfür eine kollisionsfreie Solltrajektorie für die Bewegungsregelung.

Die von der Bewegungsregelung erzeugten Stellgrößen werden an die Ebene des Rückenmarks übermittelt und dort für die Regelung der Fahrzeugaktorik genutzt.

Auf allen drei Ebenen wird die dienstbasierte Softwarearchitektur ASOA eingesetzt. Diese Architektur ermöglicht eine ebenen- und hardwareübergreifende Kommunikation zwischen den Diensten des automatisierten Fahrzeugs.

3 Anforderungen an eine dienstbasierte maschinelle Rückfallebene

Die maschinelle Rückfallebene eines automatisierten Fahrzeugs wird aktiviert, wenn die Fähigkeiten (engl.: abilities) der primären Fahrfunktionen durch funktionale Einschränkungen nicht länger für die Erfüllung der dynamischen Fahraufgabe ausreichen. In diesen Fällen überführt die Rückfallebene das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand. Reschka beschreibt in seiner Dissertation [7] drei verschiedene Fahrmanöver, mit denen sich ein Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand überführen lässt. Beim ersten Fahrmanöver wird das Fahrzeug mit einer starken Verzögerung (bis zu 6 m/s^2) bei gleichzeitig konstan-

tem Lenkwinkel in den Stillstand überführt. Beim zweiten Fahrmanöver wird ohne eine weitere Umfeldsensierung die zuletzt geplante Bahn durch Nutzung der Querführung bei gleichzeitiger Verzögerung in den Stillstand abgefahren. Beim dritten Fahrmanöver wird das Fahrzeug an einer geeigneten Stelle angehalten. Das automatisierte Fahrzeug muss hierfür noch in der Lage sein, Hindernisse wahrzunehmen und die umliegende Geometrie und Fahrstreifenmarkierungen zu erkennen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein viertes Fahrmanöver vorgeschlagen. Solange die Fähigkeiten der Planungsebene Großhirn für die Erfüllung ihrer Funktionen ausreichen, wird zusätzlich zur Solltrajektorie eine Notbahn geplant und an die ausfallsicher gestaltete Rückfallebene auf dem Stammhirn übertragen. Im Gegensatz zum ersten und zweiten Fahrmanöver endet diese Notbahn an einem risikominimalen Ort, der sich möglichst außerhalb des fließenden Verkehrs befindet. Sobald die Rückfallebene aktiv ist, wird anstatt der Solltrajektorie die vorausberechnete Notbahn abgefahren. Im Unterschied zum dritten Fahrmanöver beschränken sich die hierfür benötigten Fähigkeiten auf die Zwischenspeicherung der Notbahn, die Erfassung von Hindernissen und der Planung eines kollisionsfreien Geschwindigkeitsprofils zur Abfahrt der Notbahn. Das vorgeschlagene Fahrmanöver beginnt mit einer Anpassung auf eine niedrigere Fahrzeuggeschwindigkeit, um das Risiko für die Fahrzeuginsassen und das Fahrzeugumfeld zu minimieren. Die Abfahrt der Notbahn bis zu ihrem Ende erfolgt auf Basis eines örtlichen Geschwindigkeitsprofils. Werden während des Manövers Hindernisse auf der Notbahn erkannt, so wird die Fahrzeuggeschwindigkeit zur Kollisionsvermeidung entsprechend angepasst. Der örtliche Verlauf der Notbahn wird dabei nicht verlassen.

Die für die Ausführung des beschriebenen Fahrmanövers benötigten Funktionen werden in Form von Diensten in der Softwarearchitektur ASOA implementiert. In dieser Architektur existiert ein Dienst für die Bewegungsregelung des Fahrzeugs. Dieser setzt die von der Planungsebene Großhirn berechnete Solltrajektorie in Stellbefehle für die Fahrzeugaktuatorik um. Um auf die Implementierung eines zweiten Bewegungsreglers speziell für das "Sichere Anhalten" verzichten zu können, wird in der Rückfallebene eine Solltrajektorie in der gleichen Kodierung wie die der Solltrajektorie der Planungsebene erzeugt. Mit diesem Vorgehen kann der existierende Bewegungsregler sowohl von der Planungs- als auch von der Rückfallebene genutzt werden.

Um die Latenz für die Aktivierung der Rückfallebene zu minimieren, arbeiten die Dienste des "Sicheren Anhaltens" im "Hot Standby"-Betrieb. Zur kollisionsfreien Abfahrt der Notbahn wird somit auch in anderen Betriebsmodi das Fahrzeugumfeld von der Rückfallebene erfasst, eine kollisionsfreie Trajektorie erzeugt und den weiteren Diensten der ASOA zur Verfügung gestellt. Mit diesem Ansatz kann die dienstbasierte Softwarearchitektur latenzminimal auf die Rückfallebene umschalten. Zusätzlich wird mit diesem Vorgehen die Funktionsfähigkeit der Rückfallebene nachgewiesen, indem funktionale Degradationen des Systems bereits im inaktiven Betrieb aufgedeckt werden.

4 Systemarchitektur der maschinellen Rückfallebene "Sicheres Anhalten"

Zur Sicherstellung der störungsfreien Verfügbarkeit der Rückfallebene ist die relevante Hardware- und Kommunikationsarchitektur des automatisierten Fahrzeugs im Projekt

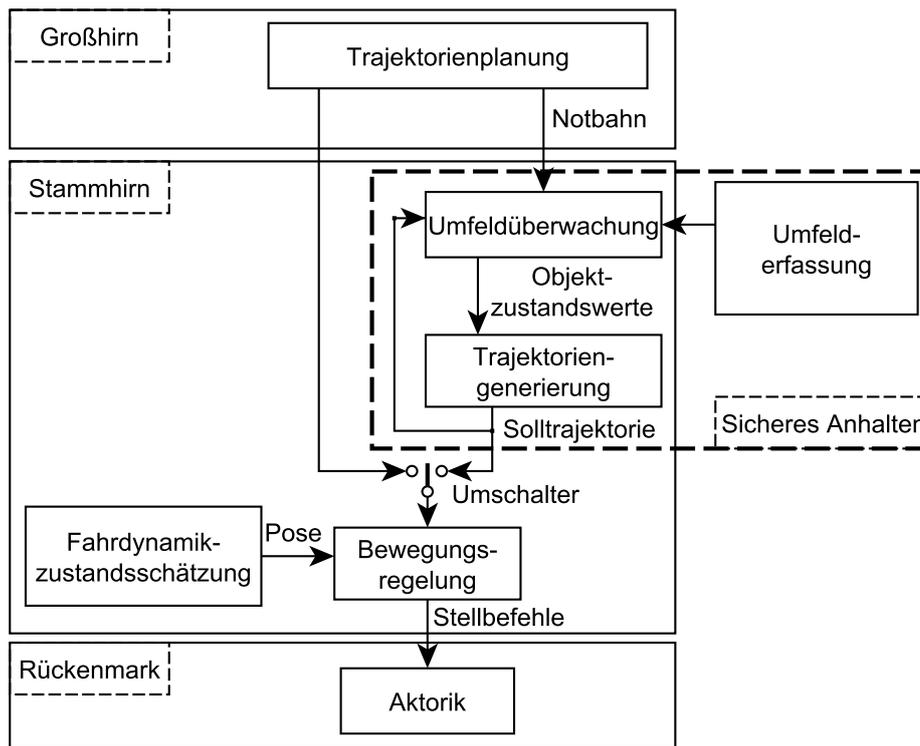


Abbildung 2: Zuordnung der Umfelderkennung und der relevanten Dienste der Rückfallebene “Sicheres Anhalten“ zur Hardwarearchitektur des Projekts UNICAR_{agil}

UNICAR_{agil} ausfallsicher gestaltet [8]. Das im vorherigen Kapitel beschriebene Fahrmanöver setzt eine dedizierte örtliche Notbahn voraus, die zusammen mit einem örtlichen Geschwindigkeitsprofil geplant wird. Die Aufgabendefinition des Trajektorienplaners auf dem Großhirn wird daher entsprechend erweitert.

Für die Überwachung des Fahrzeugumfelds wird eine Umfeldsensorik benötigt, die unabhängig von der primären Umfelderkennung des Fahrzeugs ist. Mithilfe dieser Sensorik werden potenzielle Kollisionsobjekte auf dem örtlichen Verlauf der Notbahn erfasst. Auf eine Freiflächenerkennung durch die zusätzliche Sensorik kann verzichtet werden, da die Notbahn nicht verlassen werden soll und eine grundsätzliche Befahrbarkeit schon bei der Planung der Bahn abgesichert ist.

Das Gesamtsystem der maschinellen Rückfallebene “Sicheres Anhalten“ umfasst die Umfelderkennung sowie die Dienste “Umfeldüberwachung“ und “Trajektoriengenerierung“. Beide Dienste sind in die ASOA integriert. Auf Abbildung 2 sind die Umfelderkennung und die relevanten Dienste der Rückfallebene “Sicheres Anhalten“ dargestellt und der Hardwarearchitektur des Projekts UNICAR_{agil} zugeordnet.

Notbahn oder Nottrajektorie?

Für das beschriebene Fahrmanöver zur Überführung des Fahrzeugs in einen risikominimalen Zustand wird von der Planungsebene eine Bahn und keine Trajektorie berechnet,

da der zeitliche Verlauf der Fahrzeugposen (Position und Orientierung) einer Trajektorie ungültig wird, sobald Hindernisse auf der Trajektorie eine Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit erfordern. Aus diesem Grund wird vom Großhirn eine Bahn geplant, die den örtlichen Verlauf der Fahrzeugposen beschreibt und durch ortsabhängige Geschwindigkeitsvorgaben ergänzt wird. Nach Aktivierung der Rückfallebene und während der anfänglichen Geschwindigkeitsanpassung dienen diese Vorgaben als Auslegungsgeschwindigkeiten für die Trajektoriengenerierung. Nach abgeschlossener Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit werden sie von der Trajektoriengenerierung als Maximalgeschwindigkeitsvorgaben genutzt.

4.1 Umfelderfassung

Zur kollisionsfreien Abfahrt der Notbahn wird das Fahrzeugumfeld mit einer von der restlichen Umfelderfassung des Fahrzeugs unabhängigen Sensorik erfasst. Je nach Anwendungsbereich des automatisierten Fahrzeugs werden geeignete Sensorprinzipien ausgewählt. Die Sensorreichweite ist so zu wählen, dass in jedem Fahrzustand rechtzeitig auf Hindernisse im Fahrzeugumfeld reagiert werden kann. Dies bedeutet, dass insbesondere in den Hauptbewegungsrichtungen des Fahrzeugs eine größere Sensorreichweite gefordert ist.

Im Projekt UNICAR*agil* wird ein Fahrzeug gezeigt, das eine 360°-Bewegungsrichtung haben kann. Die maximalen Geschwindigkeiten werden dabei in den beiden Fahrzeuglängsrichtungen gezeigt und betragen vorwärts etwa 20 m/s und rückwärts 10 m/s. Die entwickelte Hardware des Stammhirns nutzt eingebettete Systeme (engl.: embedded systems) und stellt somit nicht die von Hochleistungsrechnern mit Grafikkarten bekannte Rechenleistung zur Verfügung. Aus diesem Grund wird eine sensornahere Verarbeitung der Sensorrohdaten angestrebt. Aufgrund der geforderten Sensorreichweite in den Hauptbewegungsrichtungen und der sensornahen Rohdatenverarbeitung werden für die Rückfallebene im Projekt UNICAR*agil* Radarsensoren in Fahrzeugfront und -heck eingesetzt.

Zur Absicherung der 360°-Bewegungsrichtung des Fahrzeugs werden die beiden Radarsensoren durch eine 360°-Umfelderfassung ergänzt. Fahrten mit großen Schwimmwinkeln sind im Projekt nur mit niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten erlaubt. Es wird somit eine vergleichsweise geringe Sensorreichweite gefordert. Mithilfe dieser zweiten Umfelderfassung wird zusätzlich die Abfahrt der Notbahn mit Auslegungsgeschwindigkeit abgesichert. Aufgrund der geforderten Sensorreichweite und 360°-Überwachung sowie der sensornahen Rohdatenverarbeitung werden in diesem Projekt Ultraschallsensoren und Kameras mit Fischaugenobjektiven als zweiter Bestandteil der Umfelderfassung für das "Sichere Anhalten" eingesetzt.

4.2 Umfeldüberwachung

Die Sensoren der Umfelderfassung sind mit dem Stammhirn und damit mit dem Dienst "Umfeldüberwachung" verbunden. Dieser fusioniert die Daten der Umfeldsensoren zu einem gemeinsamen Umfeldmodell. Zusätzlich empfängt dieser Dienst die zuletzt geplante Notbahn vom Trajektorienplaner des Großhirns.

Aufgabe dieses Dienstes ist die Prüfung der Notbahn auf mögliche Kollisionsobjekte. Mit dem Wissen über den örtlichen Verlauf der Notbahn und dem geplanten Geschwindigkeitsprofil kann die eigene zukünftige Fahrzeugpose (Position und Orientierung) voraus-

berechnet werden. Zusammen mit der eigenen Fahrzeugausdehnung (Breite und Höhe des Fahrzeugs ergänzt mit einem Sicherheitsabstand) und dem zeitlichen Verlauf der eigenen Fahrzeugposen wird somit ein örtlicher und zeitlicher Raum im Umfeld beschrieben, der als Fahrschlauch bezeichnet wird. Mithilfe der durch die Umfelderkennung detektierten Objekte und deren Prädiktionen werden Kollisionsobjekte aufgedeckt, die mit diesem Fahrschlauch sowohl örtlich als auch zeitlich kollidieren. Wird ein solches Objekt detektiert erfolgt die Planung eines kollisionsvermeidenden örtlichen Geschwindigkeitsprofils, das von der nachfolgenden Trajektoriengenerierung umgesetzt wird, s.a. [9].

4.3 Trajektoriengenerierung

Der Dienst "Trajektoriengenerierung" erzeugt kollisionsfreie und geschwindigkeitsangepasste Solltrajektorien für die Bewegungsregelung auf dem Stammhirn. Die Kodierung der Solltrajektorie ist dabei identisch zur Kodierung der Solltrajektorie, die vom Trajektorienplaner des Großhirns erzeugt wird. Mit diesem Ansatz ist es nicht erforderlich, dass eine dedizierte Bewegungsregelung für die Rückfallebene implementiert wird. Um eine Verwechslung mit der Solltrajektorie des Großhirns zu vermeiden wird im weiteren Verlauf des Beitrags die Solltrajektorie, die von der Rückfallebene generiert wird, als Nottrajektorie bezeichnet.

Der örtliche Verlauf der Nottrajektorie wird vollständig von der zuletzt vom Großhirn übermittelten Notbahn übernommen, da ein örtliches Abweichen von der Notbahn aufgrund fehlender Informationen über das Fahrzeugumfeld nicht abgesichert werden kann. Um aus dem örtlichen Verlauf der Notbahn eine explizite Beschreibung der Nottrajektorie zu erzeugen, wird ein örtliches Geschwindigkeitsprofil gesucht. Dieses Geschwindigkeitsprofil wird während der Abfahrt der Nottrajektorie entsprechend des erfassten Fahrzeugumfelds aktualisiert. Eine Änderung des Geschwindigkeitsprofils bedingt damit auch eine Änderung der Nottrajektorie. Das Geschwindigkeitsprofil wird aus verschiedenen Einzelprofilen erzeugt. Das erste Geschwindigkeitsprofil ist die Auslegungsgeschwindigkeit für die Notbahn, die in der Planungsphase vom Großhirn berechnet wurde. Ein weiteres Geschwindigkeitsprofil wird auf Basis der Objektzustandswerte, die von der Umfelderkennung detektiert wurden, erzeugt. Das Profil wird so geplant, dass das Fahrzeug dynamischen Objekten mit einer definierten Zeitlücke folgt und hinter statischen Objekten mit einem definierten Abstand anhält.

Bei der Planung der Auslegungsgeschwindigkeit der Notbahn werden die fahrdynamischen Grenzen des Fahrzeugs beachtet. Die von der Planung gewählten Ausführungsgrenzen sind allerdings nicht statisch, sondern ändern sich sowohl über den Ort als auch über die Zeit. Ein Dienst in der Softwarearchitektur des Fahrzeugs liefert die zum aktuellen Zeitpunkt gültigen Ausführungsgrenzen. Zusammen mit dem örtlichen Verlauf der Notbahn wird auf Basis dieser Ausführungsgrenzen ein Geschwindigkeitsprofil geplant, das vorbeugt, dass das Fahrzeug in einen instabilen Fahrdynamikbereich gerät.

Über einen ortsdiskreten Vergleich der Geschwindigkeitsprofile wird das Minimum für die Trajektoriengenerierung ermittelt.

Aus dem örtlichen Verlauf der Notbahn und dem berechneten Geschwindigkeitsprofil wird schließlich eine von dem Bewegungsregler interpretierbare Nottrajektorie erzeugt. Die vom Großhirn übermittelten Positionen der Notbahn liegen in einem global ellipsoidischen Koordinatensystem. Als geodätisches Referenzsystem wird im Projekt UNICAR*agil* ETRS89 [10] verwendet. Die global ellipsoidischen Koordinaten der Notbahn werden in einem ers-

ten Schritt in global kartesische Koordinaten umgerechnet. Diese weiterhin dreidimensionalen Koordinaten werden im zweiten Schritt in eine zweidimensionale Ebene gedreht. Diese Ebene tangiert das für das Referenzsystem ETRS89 genutzte GRS80 Ellipsoid im Aufpunkt der Notbahn. Für die Drehung der dreidimensionalen Koordinaten werden Vektoren zwischen dem Aufpunkt der Notbahn und allen nachfolgenden Koordinaten der Notbahn erzeugt. Jeder dieser Vektoren wird anschließend in die zweidimensionale Ebene transformiert. Nach der Umrechnung liegt der örtliche Verlauf der Notbahn in einem zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem mit Ursprung im Aufpunkt der Notbahn vor. Unverändert ist die Notbahn nur an diskreten Koordinaten definiert. Für die vollständige Beschreibung der Bahn wird zwischen diesen Koordinaten eine Interpolation durchgeführt. Eine Randbedingung der Nottrajektorie ist, dass der enthaltene Beschleunigungsverlauf stetig sein soll. Ein linearer Beschleunigungsverlauf führt nach zweimaliger Integration auf einen kubischen Positionsverlauf. Aus diesem Grund erfolgt die Interpolation zwischen den diskreten Positionen mithilfe eines kubischen Splines. Das berechnete Geschwindigkeitsprofil ist gleichermaßen nur an diskreten Stellen definiert. Somit wird auch hier eine Interpolation zwischen den diskreten Stellen durchgeführt. Da ein stetiger Beschleunigungsverlauf gefordert ist, wird eine quadratische Interpolation gewählt. Abschließend ist auch die Fahrzeugorientierung nur an den diskreten Aufpunkten der Bahn definiert. Analog findet daher auch hier eine kubische Interpolation statt. Alle Splines nutzen als Splineparameter den Weg über den örtlichen kubischen Spline.

Die Nottrajektorie besteht aus zeitlich äquidistanten Sollzuständen. Mithilfe des interpolierten Geschwindigkeitsprofils werden die Wegpunkte auf dem örtlichen Spline zu den äquidistanten Zeitpunkten ermittelt. Die Posen der Trajektorie werden durch Auswertung der entsprechenden Splines an den berechneten Wegpunkten ermittelt. Analog wird für jedes Trajektorienelement auch ein Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor berechnet. Ergebnis ist eine zeitlich äquidistante diskrete Beschreibung einer Nottrajektorie in Pose, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Diese Trajektorie wird an die Bewegungsregelung übertragen.

5 Fazit und Ausblick

Bei automatisierten, fahrerlosen Fahrzeugen steht bei funktionalen Einschränkungen der dynamischen Fahrfunktionen der menschliche Fahrer nicht als Rückfallebene zur Verfügung. In diesen Fällen erfüllt ein maschinelles System die Funktionen einer Rückfallebene, um das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand zu überführen. Für diese Zustandsüberführung wurden aus der Literatur bekannte Fahrmanöver vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eigenschaften analysiert. Auf Basis dieser Analyse wurde ein neues Fahrmanöver vorgestellt und dargelegt, dass dieses Manöver die Überführung eines automatisierten Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand außerhalb des fließenden Verkehrs ermöglicht. Im nächsten Schritt wurden Anforderungen an die funktionale Rückfallebene zur Ausführung des neuen Fahrmanövers vorgestellt. Da die zeitlichen Informationen einer Trajektorie ungültig werden, sobald die Fahrzeuggeschwindigkeit aufgrund erfasster Hindernisse angepasst wird, plant das Großhirn anstatt einer Trajektorie eine Bahn mit örtlichem Geschwindigkeitsprofil. Es wurde gezeigt, dass die Modularität der Hard- und Software des im Projekt UNICAR*agil* erforschten automatisierten Fahrzeugs für die Implementierung der für das Manöver notwendigen Funktionen geeignet ist und entsprechende Aufgabende-

definitionen für die drei Hardwareebenen abgeleitet. Für die Hardwareebene des Stammhirns wurden die Funktionen der Rückfallebene in Dienste unterteilt und ihre jeweiligen Teilfunktionen beschrieben.

In zukünftigen Forschungsarbeiten sollten die vorgestellten Teilfunktionen der Rückfallebene näher untersucht werden. Welche Fähigkeiten müssen diese Teilfunktionen erfüllen? Mit welchen Metriken können diese Fähigkeiten bewertet werden? Wie können die Teil-, aber auch die Gesamtfunktion der Rückfallebene abgesichert werden? Welche Abhängigkeiten herrschen zwischen den Teilfunktionen?

Für die beschriebenen Funktionen der Rückfallebene sind Erweiterungen denkbar. Möglich ist beispielsweise, dass die Schnelligkeit der Geschwindigkeitsanpassung des Fahrzeugs nach Aktivierung der Rückfallebene variabel gestaltet wird und beispielsweise abhängig vom rückwärtigen Verkehr (geringere Verzögerung bei kleiner Zeitlücke zum Folgefahrzeug) und der Art des Transports (bspw. geringere Verzögerung bei stehenden Fahrzeuginsassen) sein kann.

Mit der vorgestellten Systemarchitektur ist es möglich, eine zusätzliche Absicherung der von der Planungsebene berechneten Solltrajektorie durchzuführen. Durch die Einführung der vorgestellten Rückfallebene steht eine zweite, unabhängige Umfelderkennung zur Verfügung. Diese kann genutzt werden, um die Solltrajektorie vor der Ausführung von einer zweiten Instanz überprüfen zu lassen und bei erfassten Hindernissen eine entsprechende Reaktion auszulösen. Möglich wäre außerdem die Aufdeckung von Degradationen der Umfelderkennungssysteme durch widersprüchliche Umfeldmodelle.

Die Absicherung mithilfe der zweiten Umfelderkennung soll auch auf extern geplante Trajektorien oder Bahnen ausgeweitet werden. Im Projekt UNICAR^{agil} ist eine Teleoperation geplant, mit der ein menschlicher Operator das Fahrzeug durch eine direkte Steuerung oder durch Vorgabe einer Trajektorie bewegen kann. Auch diese Vorgaben können mithilfe der Umfeldüberwachung der Rückfallebene abgesichert werden.

Im weiteren Verlauf des Projekts wird die vorgestellte Rückfallebene implementiert und die in diesem Kapitel genannten Forschungsfragen bearbeitet.

Acknowledgement

Diese Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projekts „UNICAR^{agil}“ durchgeführt (FKZ 16EMO0286). Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung des Projekts durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Literatur

- [1] SAE International, *SAE J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, 2018.
- [2] C. Arzt und S. Ruth-Schumacher, *Überführen hoch- oder vollautomatisierter Fahrzeuge in den „risikominimalen Zustand“* in *Recht Automobil Wirtschaft - RAW*, Heft 2/2017. S. 89 - 98, 2017.

- [3] UNECE, *Harmonization of Vehicle Regulations* [Online] Verfügbar unter: https://www.unece.org/trans/main/wp29/meeting_docs_wp29.html. Zugriff am: Aug. 21 2019.
- [4] UNECE, *Automatically Commanded Steering Function (ACSF) - Transport - Vehicle Regulations* [Online] Verfügbar unter: <https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=25265606>. Zugriff am: Aug. 21 2019.
- [5] T. Woopen, B. Lampe, T. Böddeker, L. Eckstein, A. Kampmann, B. Alrifaae, S. Kowalewski, D. Moormann, T. Stolte, I. Jatzkowski, M. Maurer, M. Möstl, R. Ernst, S. Ackermann, C. Amersbach, S. Leinen, H. Winner, D. Püllen, S. Katzenbeisser, M. Becker, C. Stiller, K. Furmans, K. Bengler, F. Diermeyer, M. Lienkamp, D. Keilhoff, H.-C. Reuss, M. Buchholz, K. Dietmayer, H. Lategahn, N. Siepenkötter, M. Elbs, E. von Hinüber, M. Dupuis und C. Hecker, *UNICARagil - Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts* in *27th Aachen Colloquium*, Aachen, Germany, S. 663 - 694, 2018
- [6] T. Stolte, G. Bagschik, A. Reschka, M. Maurer, *Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen (aFAS)* in *AAET 2015-Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, S. 371 - 390, 2015
- [7] A. Reschka, *Fertigkeiten- und Fähigkeitengraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung*, 2017
- [8] D. Keilhoff, D. Niedballa, H.-C. Reuss, M. Buchholz, F. Gies, K. Dietmayer, M. Lauer, C. Stiller; S. Ackermann, H. Winner; A. Kampmann, B. Alrifaae, S. Kowalewski; F. Klein, M. Struth, T. Woopen, L. Eckstein *UNICARagil - New Architectures for Disruptive Vehicle Concepts* in *19th Stuttgart International Symposium - Automotive and Engine Technology*, Stuttgart, Germany, 2019
- [9] S. Ackermann, H. Winner, M. Buchholz *Modul und Verfahren zur Absicherung von Solltrajektorien für automatisiertes Fahren*, Deutsche Patentanmeldung, Patent Anmelde nummer: 10 2019 125 401.9, 2019
- [10] EUREF *EUROPEAN TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM 89 (ETRS89)* [Online] Verfügbar unter: <http://etrs89.ensg.ign.fr/>. Zugriff am: Dez. 15 2019