

Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen (aFAS)

Torben Stolte; Gerrit Bagschik; Andreas Reschka; Markus Maurer
Technische Universität Braunschweig, Institut für Regelungstechnik
{stolte,bagschik,reschka,maurer}@ifr.ing.tu-bs.de

Abstract

Wanderbaustellen auf dem Seitenstreifen von Autobahnen werden häufig durch ein mit einer Anzeigetafel ausgestattetes Absicherungsfahrzeug gegen den fließenden Verkehr abgesichert. Eine besondere Gefährdung durch auffahrenden Verkehr kommt den Mitarbeitern des Straßenbetriebsdiensts zu, die das Absicherungsfahrzeug fahren. Mit der Motivation diese Gefährdung zu reduzieren wird im Rahmen des Projekts aFAS ein Absicherungsfahrzeug entwickelt, das in der Lage ist, sich fahrerlos auf dem Seitenstreifen einer Autobahn zu bewegen.

Der vorliegende Beitrag stellt die grundsätzlichen Ziele des Projekts aFAS vor und gibt einen Einblick in die geplante Systemrealisierung. Durch den erstmaligen Einsatz eines fahrerlosen Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr resultieren besondere Herausforderungen in der funktionalen Sicherheit des fahrerlosen Betriebs. Dazu wird in Anlehnung an die Norm ISO 26262 ein zweisträngiges Vorgehen bei der Sicherheitskonzeption vorgestellt. Zudem ergeben sich durch den erstmaligen Einsatz eines fahrerlosen Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr wissenschaftliche Fragestellungen. Diese werden bezüglich technischer, normativer und juristischer Aspekte vorgestellt.

Einleitung

Bereits auf der AAET 2012 wurde eine Untersuchung von Einsatzmöglichkeiten automatisierter Fahrzeuge im Straßenbetriebsdienst auf Autobahnen vorgestellt (Ohl u. a., 2012). Ohl u. a. diskutieren zwei unterschiedliche Einsatzszenarien zur Absicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer (AkD, umgangssprachlich „Wanderbaustellen“) auf dem Seitenstreifen von Autobahnen. Die vorgestellten Einsatzszenarien unterscheiden sich im Anteil der automatisiert an der Baustelle beteiligten Arbeitsfahrzeuge. Während im Szenario 2 sämtliche beteiligten Fahrzeuge für die Dauer der Arbeiten automatisiert betrieben werden, trifft dieses im Szenario 1 nur auf das Folge- oder Absicherungsfahrzeug zu. Dieses sichert die Arbeitsstelle nach hinten gegen den fließenden Verkehr ab und folgt den Arbeitsfahrzeugen automatisch in einem definierten Abstand.

Aufbauend auf diesen Vorarbeiten wird in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über vier Jahre geförderten Projekt „Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen“ (aFAS) seit August 2014 ein Einsatzszenario ähnlich des von Ohl u. a. (2012) vorgestellten Szenarios 1 realisiert, wie Abbildung 1 andeutet.

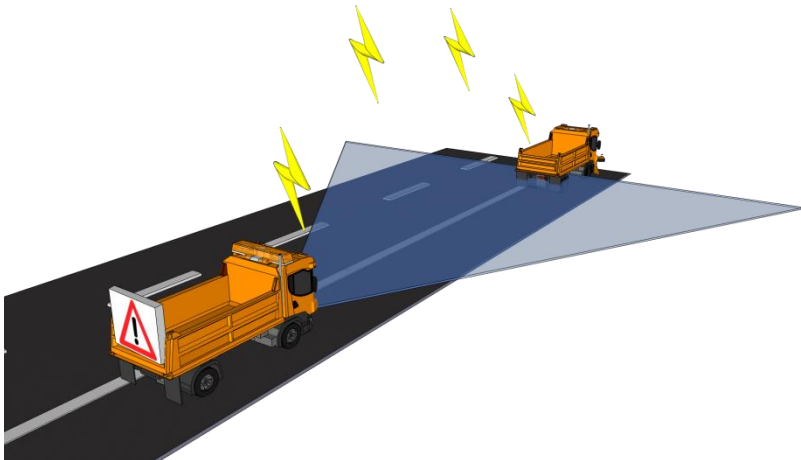


Abbildung 1: Fahrerloses Absicherungsfahrzeug mit Führungsfahrzeug

Das Projektkonsortium setzt sich neben Vertretern der Industrie (MAN Truck & Bus AG (Konsortialführer), TRW Automotive GmbH, WABCO Development GmbH, ZF-Lenkssysteme GmbH) aus Vertretern aus Wissenschaft und Forschung (Hochschule Karlsruhe, Technische Universität Braunschweig) sowie dem Straßenbetriebsdienst Hessen Mobil – Straßen- und Verkehrsmanagement und der Bundesanstalt für Straßenwesen zusammen.

Dieser Beitrag stellt die wesentlichen Aspekte und Herausforderungen des Projekts aFAS vor.

Motivation und Zielsetzung

Mitarbeiter des Straßenbetriebsdienstes, die an Arbeitsstellen kürzerer Dauer eingesetzt werden, sind trotz umfangreicher Sicherungsmaßnahmen durch den fließenden Verkehr gefährdet. Dies gilt insbesondere für die Besetzung des Absicherungsfahrzeugs, welches die Arbeitsstelle nach hinten gegen den fließenden Verkehr absichert (Roos u. a., 2008). Durch ein für die Einsatzzeit automatisiert betriebenes und fahrerloses Absicherungsfahrzeug entfällt diese Gefährdung zumindest auf Seiten der Straßenbetriebsdienste.

Durch den fahrerlosen Betrieb unterscheidet sich das geplante System von aktuell in Straßenfahrzeugen verfügbaren automatisierten Fahrfunktionen, wie z.B. Abstandsregeltempomaten, Spurhaltesystemen oder auch automatischen Einparksystemen. Der Fahrer dient in diesen Systemen als Rückfallebene für den Fehlerfall oder für Funktionslücken. Er hat die Aufgabe, den Fahrzeugzustand permanent zu überwachen und die Fahrzeugführung ggf. in kritischen Fahrsituationen zu übernehmen. Dies trifft auch auf aktuelle Forschungsprojekte im Bereich der Fahrzeugautomatisierung, wie der so genannten Bertha-Benz-Fahrt 2013 des Karlsruher Institut für Technologie und der Daimler AG (Ziegler u. a., 2014) und dem Projekt Stadtpilot der TU Braunschweig zu (Nothdurft u. a., 2011; Wille u. a., 2010). Die entwickelten Systeme sind nach der Definition unterschiedlicher Automati-

sierungsgrade nach Gasser u. a. (2012) als teilautomatisiert bzw. nach SAE (2014) als Partial Automation einzustufen (Ohl, 2014).

Die Überwachung des fahrerlosen Betriebs durch den Fahrer soll im Projekt aFAS aufgrund der eben beschriebenen besonderen Gefährdung des Absicherungsfahrzeugs keine Anwendung finden. Auch eine permanente Überwachung aus dem Arbeitsfahrzeug, im Folgenden Führungsfahrzeug genannt, ist nicht vorgesehen, da angenommen wird, dass der Überwacher nicht in der Lage ist, eine permanente Überwachung zu garantieren (Bainbridge, 1983). Dies unterscheidet das Projekt aFAS auch von den Aktivitäten der DARPA Urban Challenge 2007, da dort eine Überwachung der Fahrzeuge aus einem nachfolgenden Fahrzeug erforderlich war. Über eine Funkverbindung konnten die fahrerlosen Fahrzeuge gestoppt werden (Singh, 2008a, 2008b, 2008c).

Das elektronische Fahrzeugführungssystem im Absicherungsfahrzeug wird daher entsprechend der Definitionen von Gasser u. a. (2012) und SAE (2014) als vollautomatisiert bzw. High Automation eingestuft. Für den Einsatz von hoch- bis vollautomatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr bedarf es der Klärung der straßenverkehrsrechtlichen Zulässigkeit, da beispielsweise die Beweislastverteilung nach dem Straßenverkehrsgesetz unklar ist (Gasser u. a., 2012).

Parallel dazu ergeben sich durch den Einsatz auf dem Seitenstreifen einer Autobahn und durch die niedrigen Arbeitsgeschwindigkeiten der Arbeitsstellen kürzerer Dauer im Gegensatz zum komplexen Verkehrsgeschehen z.B. in Städten vergleichsweise einfache Randbedingungen. Dies betrifft sowohl die Erfassung und Interpretation der Fahrzeugumgebung als auch das Verhalten im Fehlerfall. Deswegen eignet sich der beschriebene Anwendungsfall für die erstmalige Umsetzung eines Fahrzeugführungssystems für fahrerlose Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr. Besondere Beachtung findet die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts.

Für die Serienentwicklung von elektronischen Systemen in Straßenfahrzeugen bis 3,5t spiegelt die Norm ISO 26262 den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf die funktionale Sicherheit wieder (ISO, 2011). Obwohl es

im hier beschriebenen Projekt um die prototypische Umsetzung eines fahrerlosen Absicherungsfahrzeugs mit höherem zulässigen Gesamtgewicht geht, soll ein Sicherheitskonzept nach der Norm ISO 26262 entwickelt werden. Dies zielt auf zwei Aspekte ab. Erstens soll ein Sicherheitskonzept entstehen, welches als Ausgangsbasis für eine spätere Serienentwicklung dienen kann. Zweitens soll gleichzeitig die grundsätzliche Anwendbarkeit der Norm auf vollautomatisierte Fahrzeugsysteme untersucht werden.

Daraus abgeleitet ergeben sich vier wesentliche Zielsetzungen für das Projekt aFAS:

- Entwicklung eines automatisch fahrerlos fahrenden Absicherungsfahrzeugs für Arbeitsstellen auf Autobahnen
- Entwicklung eines Sicherheitskonzepts gemäß der Norm ISO 26262 und dessen Umsetzung im Absicherungsfahrzeug
- Betrachtung rechtlicher Aspekte des automatisierten Fahrens sowie Grenzen einschlägiger Normen der Funktionalen Sicherheit, insbesondere der Norm ISO 26262
- Erstmaliger Einsatz eines fahrerlosen Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr

Funktionsumfang

Ein typisches Einsatzszenario für das fahrerlose Absicherungsfahrzeug sieht wie folgt aus: Zu Einsatzbeginn wird das Fahrzeug von einem menschlichen Fahrer an die Arbeitsstelle auf der Autobahn gefahren. An der Arbeitsstelle stellt dieser das Fahrzeug auf dem Seitenstreifen der Autobahn ab und wechselt in das vorausfahrende Führungsfahrzeug, das je nach Einsatzart auch die eigentlichen Arbeiten ausführen kann. Dort aktiviert er über eine Nutzerschnittstelle den fahrerlosen Betrieb des Absicherungsfahrzeugs. Das Fahrzeugführungssystem übernimmt die Längs- und Querführung des Absicherungsfahrzeugs und folgt dem Führungsfahrzeug in ausreichend großem Abstand mit langsamer Geschwindigkeit.

Das Passieren von Ein- und Ausfahrten der Autobahnen ist ebenfalls Teil des Funktionsumfangs des fahrerlosen Betriebs des Absicherungsfahr-

zeugs. Dabei folgt das Absicherungsfahrzeug dem Führungsfahrzeug in geringem Abstand. Dies wird vom Führungsfahrzeug aus gesondert angefordert, woraufhin das Absicherungsfahrzeug zum Führungsfahrzeug aufschließt. Zum einen wird dadurch sichergestellt, dass die Wanderbaustelle die Ein- oder Ausfahrt sicher passiert und kein Hindernis für den fließenden Verkehr darstellt. Zum anderen wird ein Einscheren von anderen Verkehrsteilnehmern zwischen Führungsfahrzeug und fahrerlosem Absicherungsfahrzeug durch deren geringen Abstand erschwert, um eine Gefährdung des einscherenden Fahrzeugs zu reduzieren. Nach dem automatisierten Einsatz wechselt der Fahrer zurück in das Absicherungsfahrzeug und fährt dieses manuell zurück ins Depot.

Betriebsmodi

Aus dem Funktionsumfang leiten sich wie in Abbildung 2 dargestellt vier Betriebsmodi ab, in denen das fahrerlose Absicherungsfahrzeug betrieben werden kann. Für die An- und Abfahrt zur Arbeitsstelle wird das Fahrzeug im *manuellen Betriebsmodus* von einem Fahrer wie ein herkömmliches Fahrzeug geführt und an die Arbeitsstelle gesteuert. Das Fahrzeugführungssystem ist dabei nicht aktiv. Für den fahrerlosen Betrieb wird das Fahrzeugführungssystem aktiviert. Es ergeben sich die Betriebsmodi *Folgefahrt* für die Absicherung der Arbeitsstelle und *Gekoppelte Fahrt* zur Überbrückung von Ein- und Ausfahrten. Zusätzlich wird der Betriebsmodus *Sicheres Anhalten* eingeführt.

Das *Sichere Anhalten* kann aus dem *manuellen Betriebsmodus* nur im Stillstand des Fahrzeugs aktiviert werden. Es stellt den Ausgangsbetriebsmodus für die anderen beiden Betriebsmodi des fahrerlosen Betriebs dar. Im fahrerlosen Betrieb kann das *Sichere Anhalten* aus allen Betriebsmodi erreicht werden. Das Absicherungsfahrzeug befindet sich dabei im Stillstand bzw. wird in diesen gebremst, sofern das Fahrzeug noch in Bewegung ist, und mit der Park- oder Betriebsbremse gesichert. Die Transition in diesen Betriebsmodus soll auch erfolgen, sobald das Fahrzeugführungssystem eine Überschreitung einer funktionalen Systemgrenze detektiert. Die funktiona-

len Systemgrenzen werden maßgeblich durch das Einsatzgebiet, die Umfeldbedingungen und den im Projektlauf zu detaillierenden Funktionsumfang festgelegt.

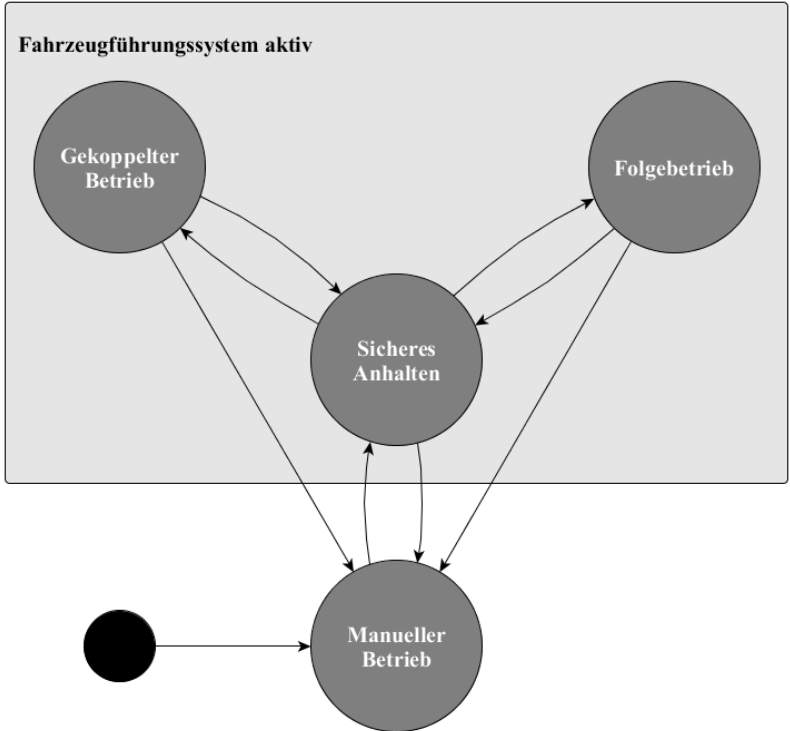


Abbildung 2: Betriebsmodi des fahrerlosen Absicherungsfahrzeugs

Ausgehend vom *Sicheren Anhalten* kann entweder die *Folgefahrt* oder die *Gekoppelte Fahrt* aktiviert werden. Während der *Folgefahrt* werden die eigentlichen Arbeiten (z.B. Mähen) durch das Führungsfahrzeug an der Arbeitsstelle durchgeführt. Das fahrerlose Fahrzeug folgt dabei dem Führungsfahrzeug auf dem Seitenstreifen der Autobahn in einem im Projektlauf noch zu definierenden Abstand. Die Geschwindigkeit ist auf einen niedrigen Geschwindigkeitsbereich oberhalb der Schrittgeschwindigkeit begrenzt. Der

genaue Wert wird im Verlauf der ersten Projektphase diskutiert und festgelegt. Die Längs- und Querführung wird durch das Fahrzeugführungssystem auf Basis der Daten der Umfeldwahrnehmung realisiert. Die Umfeldwahrnehmung verarbeitet Umgebungsinformationen und extrahiert daraus das Führungsfahrzeug, den Seitenstreifen sowie weitere Objekte. Im Falle von Hindernissen vor dem fahrerlosen Fahrzeug, z.B. ein auf den Seitenstreifen einscherendes Fahrzeug, wechselt das fahrerlose Absicherungsfahrzeug selbstständig in den Betriebsmodus *Sicheres Anhalten*. Gleiches gilt auch, wenn die Systeme für den fahrerlosen Betrieb feststellen, dass sie nicht mehr in der Lage sind den fahrerlosen Betrieb aufrecht zu erhalten. Dieser Fall kann beispielsweise durch einen fast leeren Tank oder eine Funktionseinschränkung in der Sensorik eintreten.

Auch beim *Gekoppelten Betrieb* folgt das fahrerlose Absicherungsfahrzeug dem Führungsfahrzeug automatisch. Im Gegensatz zur *Folgefahrt* wird hierbei die Längs- und Querführung jedoch in erster Linie auf Basis von Informationen über Steuer- und Zustandsgrößen des Führungsfahrzeugs in Anlehnung an das Projekt KONVOI (2009) realisiert. Das Absicherungsfahrzeug folgt dem Führungsfahrzeug dabei in geringem Abstand. Somit ist sichergestellt, dass Führungs- und Absicherungsfahrzeug in der Lage sind Ein- und Ausfahrten zügig zu passieren, ohne dass andere Verkehrsteilnehmer in den Verbund einscheren können. Sowohl der Abstand als auch die maximale Geschwindigkeit des *Gekoppelten Betriebs* sind Gegenstand der Definitionsphase.

Aus den drei Betriebsmodi des fahrerlosen Betriebs kann jederzeit durch einen Eingriff in Lenkrad, Gas- oder Bremspedal in den *manuellen Betrieb* gewechselt werden. Hiermit ist ein Sicherheitsfahrer im Absicherungsfahrzeug in der Erprobungsphase stets in der Lage, das Fahrzeugführungssystem zu übersteuern.

Geplanter Systemaufbau

Um das Fahrzeug in den genannten Betriebsmodi betreiben zu können, sind mehrere Komponenten notwendig. Aus ökonomischen Gesichtspunkten soll nach Möglichkeit auf bereits bestehende Komponenten der Projektpartner zurückgegriffen werden. Gegebenenfalls erfolgt im Verlauf des Projekts eine Weiterentwicklung der Komponenten, um den Anforderungen des Projekts gerecht zu werden. Eine Skizze des geplanten Systemaufbaus ist Abbildung 3 zu entnehmen.

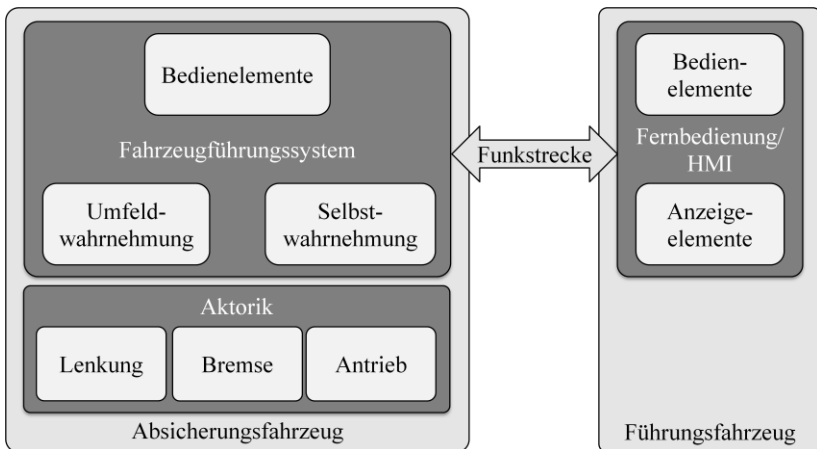


Abbildung 3: Komponenten des fahrerlosen Betriebs des Absicherungsfahrzeugs (HMI: Human-Machine-Interface)

Auf Seiten der Aktorik sind bereits entsprechende Systeme bei den am Projekt beteiligten Industriepartnern vorhanden. Aus Umsetzungsperspektive müssen Lenkung, Bremse und Antrieb in erster Linie eine Schnittstelle bereitstellen, mit der diese elektronisch angesteuert werden können.

Eine weitere wesentliche Rolle spielt die Umfeldwahrnehmung, insbesondere bezogen auf die Wahrnehmung des Raums vor dem Absicherungsfahrzeug. Zum einen muss aus der virtuellen Abbildung des Umfelds im Absicherungsfahrzeug der Seitenstreifen extrahiert werden. Dies ist Voraus-

setzung für die Generierung der Sollwerte für die Ansteuerung der Fahrzeugaktork. Zum anderen muss die Umfeldwahrnehmung in der Lage sein, Hindernisse auf der geplanten Trajektorie wie z.B. zwischen Führungs- und Absicherungsfahrzeug einsicherende Verkehrsteilnehmer zu erkennen. Hieraus kann das Fahrzeugführungssystem entsprechende Entscheidungen über den weiteren Verlauf des fahrerlosen Betriebs ableiten. Technisch soll die Umfeldwahrnehmung mittels einer Kamera und zugehöriger Bildverarbeitung sowie Nah- und Fernfeldradar zur Objekterkennung realisiert werden.

Während des fahrerlosen Betriebs kommt der nach innen gerichteten Selbstwahrnehmung eine zentrale Rolle zu. Sie überwacht die am fahrerlosen Betrieb beteiligten Komponenten und bewertet, inwieweit das Absicherungsfahrzeug in der Lage ist, seine Aufgabe innerhalb definierter Systemgrenzen zu erfüllen. Damit soll sichergestellt werden, dass das Absicherungsfahrzeug bei Überschreiten der Systemgrenzen in den Betriebsmodus *Sicheres Anhalten* wechseln kann, auch wenn von außen betrachtet noch keine Gefährdung erkennbar ist. Entsprechend wäre keine permanente Überwachung durch einen Mitarbeiter des Straßenbetriebsdiensts im vorausfahrenden Führungsfahrzeug notwendig.

Im fehlerfreien Betrieb erfolgt das Umschalten der Betriebsmodi des fahrerlosen Betriebs vom Führungsfahrzeug aus. Ein Verlassen des Führungsfahrzeugs der Mitarbeiter des Straßenbetriebsdiensts ist somit nicht mehr nötig. Hieraus ergibt sich mit der Anbindung des Absicherungsfahrzeugs an das Führungsfahrzeug über eine Funkstrecke eine weitere notwendige Systemkomponente. Über die Funkstrecke werden Befehle zur Steuerung der Betriebsmodi des fahrerlosen Betriebs vom Führungsfahrzeug an das Absicherungsfahrzeug übermittelt. Außerdem erfolgt im *Gekoppelten Betrieb* die Übertragung der Steuer- und Zustandsgrößen des Führungsfahrzeugs an das Absicherungsfahrzeug. Auf dem Rückkanal sendet das Absicherungsfahrzeug ebenfalls laufend Informationen an das Führungsfahrzeug. Hierbei handelt es sich vor allem um Statusinformationen des fahrerlosen Betriebs sowie weiterer relevanter Zustandsgrößen. Bei Unterbre-

chung der Funkverbindung wechselt das Absicherungsfahrzeug selbstständig in den Betriebsmodus *Sicheres Anhalten*.

Als Schnittstelle zu den Mitarbeitern des Straßenbetriebsdienstes wird das Führungsfahrzeug um ein für den fahrerlosen Betrieb ausgelegtes Human-Machine-Interface (HMI) ergänzt. Auf der Eingabeseite dient das HMI zur Steuerung des fahrerlosen Betriebs des Absicherungsfahrzeugs. Insbesondere das Wechseln der Betriebsmodi ist zentraler Bestandteil der Nutzerschnittstelle. Auf der Ausgabeseite werden der aktuelle Betriebsmodus sowie weitere relevante Daten über den Zustand des Fahrzeugs sowie des Fahrzeugführungssystems dargestellt.

Sicherheitskonzeption

Der fahrerlose Betrieb des Absicherungsfahrzeugs weist in Verbindung mit dem Einsatz auf Autobahnen bei fließendem Verkehr ein besonderes Gefährdungspotential auf. Die Konsequenzen eines ungewollten Verlassens des Seitenstreifens in Richtung des rechten Fahrstreifens der Autobahn können - mit Folgen bis hin zum Tode einzelner Verkehrsteilnehmer - erheblich sein. Diese und weitere Gefährdungssituationen werden im Verlauf der Sicherheitskonzeption detailliert betrachtet. Entsprechend ist eine zentrale Zielsetzung des Projekts aFAS der Entwurf und die Umsetzung eines geeigneten Sicherheitskonzepts, welches den sicheren fahrerlosen Betrieb im Rahmen der oben beschriebenen Betriebsmodi erlaubt. Das Sicherheitskonzept soll im Rahmen des Projekts durch eine dritte, nicht am Projekt beteiligte und über entsprechende Expertise verfügende Partei abgenommen werden.

Das in Abbildung 4 dargestellte Vorgehen zum Entwurf und zur Umsetzung des Sicherheitskonzepts erfolgt in Anlehnung an die Norm ISO 26262 (ISO, 2011). Die erste Phase umfasst die Erstellung der funktionalen Systembeschreibung, der darauf aufbauenden Gefährdungsanalyse und Risikobewertung sowie der Ableitung von Sicherheitszielen. Diese Phase hat im Projektlauf ein besonderes Gewicht, da alle weiteren Schritte auf einem gemeinsamen Verständnis der zu erreichenden Funktionalität aufbauen.

Außerdem ist der Entwicklungsaufwand bei der Komponentenentwicklung der Industriepartner mit der ASIL-Einstufung der einzelnen Sicherheitsziele verknüpft.

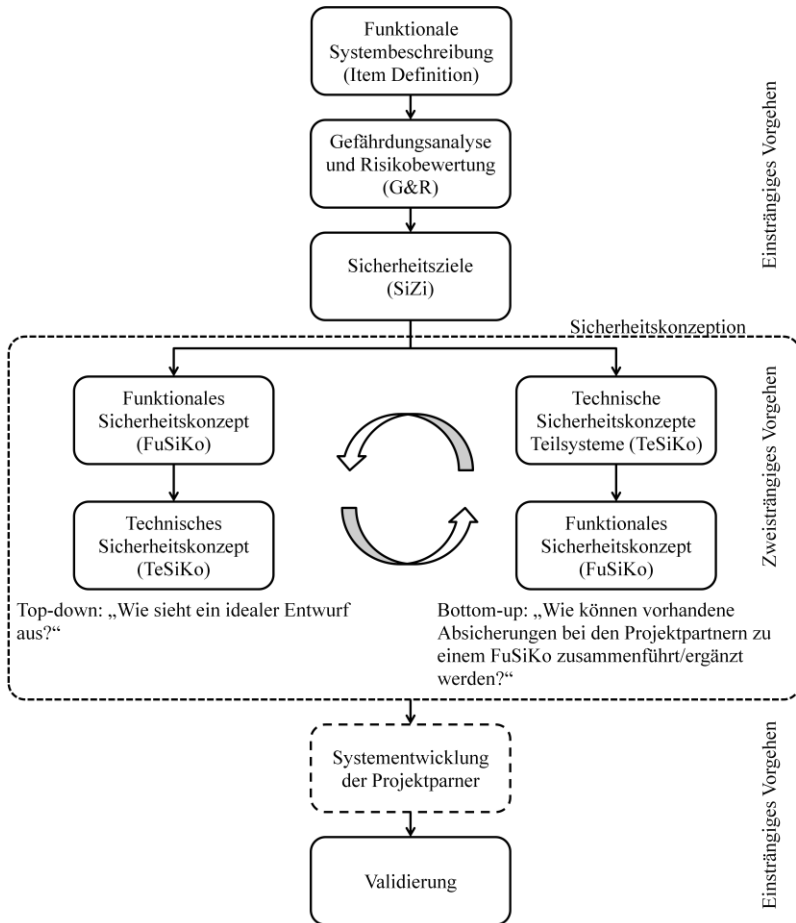


Abbildung 4: Vorgehen bei Entwurf und Umsetzung des Sicherheitskonzepts

Aufbauend auf den Sicherheitszielen wird beim Entwurf des eigentlichen Sicherheitskonzepts zweisträngig vorgegangen. Im ersten Strang bringen die Industriepartner die Sicherheitskonzepte von ihren bereits in Serie pro-

duzierten Komponenten ein. In diesem Bottom-up-Ansatz werden die Komponenten der Industriepartner zum Gesamtsystem integriert. Gleichzeitig werden die bestehenden Sicherheitskonzepte im Kontext des fahrerlosen Betriebs beurteilt, kombiniert und hinsichtlich des fahrerlosen Betriebs erweitert.

Parallel dazu wird im zweiten Strang top-down vorgegangen. Ausgehend von den Sicherheitszielen wird ein funktionales Sicherheitskonzept ohne Berücksichtigung bereits existierender Systeme entworfen. Im Gegensatz zum Bottom-up-Ansatz wird dabei die Frage beantwortet, wie ein Sicherheitskonzept für ein fahrerloses Fahrzeug aussieht, welches ohne Restriktionen durch bereits bestehende Systeme entwickelt wird.

Während der Entwicklung des Sicherheitskonzepts in den beiden Strängen erfolgt laufend ein Abgleich der Erkenntnisse. Einerseits wird auf diese Weise sichergestellt, dass ein Sicherheitskonzept entsteht, welches aus möglichst vielen Perspektiven betrachtet wurde. Andererseits sollen auf diesem Weg auch möglichst allgemeine Erkenntnisse zu Sicherheitskonzepten fahrerloser Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr gewonnen werden.

Ausgehend von dem entwickelten Sicherheitskonzept werden im Anschluss die technischen Anforderungen an die Teilsysteme der Industriepartner im Rahmen der Weiterentwicklung der von Ihnen betreuten Komponenten umgesetzt. Eine weitere Herausforderung ist die abschließende Validierung des Sicherheitskonzepts.

Wissenschaftliche Fragestellungen

Aus dem erstmaligen Einsatz eines fahrerlosen Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr gehen unterschiedliche wissenschaftliche Fragestellungen hervor. Diese betreffen sowohl technische als auch juristische und normative Aspekte, die auch in Wechselwirkung zueinander stehen.

Dieser Beitrag wendet sich frühzeitig an die wissenschaftliche Gemeinschaft, um möglichst breite Diskussionen hinsichtlich der Absicherung fahrerloser Fahrzeuge im Kontext einer offenen Einsatzumgebung anzusto-

ßen. Dabei dienen die aus dem Projekt aFAS gewonnenen Erkenntnisse als Basis für den wissenschaftlichen Austausch hinsichtlich einer weiterführenden Betrachtung fahrerloser Fahrzeuge, die sich in einem weniger definierten Umfeld und bei höherer Geschwindigkeit z.B. auf der Autobahn oder im Stadtverkehr bewegen.

Aus technischer Sicht ist die erste wichtige Herausforderung die Entwicklung und Umsetzung eines geeigneten Sicherheitskonzepts für den fahrerlosen Betrieb. Hiervon ist die gesamte Verarbeitungskette von Umfeldwahrnehmung und Sensordatenfusion über die Fahrzeugführung bis hin zur Aktorik betroffen. Der Aspekt des fahrerlosen Betriebs spielt eine besondere Rolle, da alle Aufgaben, die sonst ein menschlicher Fahrer beim Führen eines Fahrzeugs hat, in Hard- und Software implementiert werden. Dies betrifft sowohl das Erfassen des Fahrzeugumfelds (Umfeldwahrnehmung) als auch der aktuellen Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs (Selbstwahrnehmung) mit den menschlichen Sinnesfunktionen. Gleichzeitig hat der Mensch auch die Aufgabe, eine geeignete Trajektorie zu planen und unter Nutzung der Schnittstelle zur Aktorik des Fahrzeugs – typischerweise Lenkrad, Gas- und Bremspedal – abzufahren.

Mit Blick auf die Automatisierung von Fahrzeugen weisen im Bereich der Umfeldwahrnehmung unterschiedliche Sensortechnologien unterschiedliche Stärken und Schwächen auf (Winner u. a., 2012). Diese werden u.a. von den jeweils aktuellen Umgebungsbedingungen und Anwendungsfällen beeinflusst. Auf Grund dieser Defizite wird die Umfeldwahrnehmung des Absicherungsfahrzeugs mit zumindest zweifach redundanter Sensortechnologie realisiert. Jedoch stellt sich hier weiterhin die Frage, wie eine fehlerfreie Detektion von Hindernissen auf dem Seitenstreifen unter Vermeidung falsch negativer Ergebnisse realisiert werden kann. Gleiches gilt auch für die Wahrnehmung der Fahrstreifenmarkierungen und des vorausfahrenden Führungsfahrzeugs. Da kein Fahrer als zusätzliche „sensorische“ Redundanz die Umgebung des Fahrzeugs überwacht, bedarf es einer permanenten Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Umfeldwahrnehmung. Reduziert sich diese, z.B. durch den Ausfall eines Sensors, muss dieses erkannt und

bewertet werden, sodass eine geringere Leistungsfähigkeit in der nachgelagerten Fahrzeugführung berücksichtigt werden kann.

Sofern die Umgebung des Absicherungsfahrzeugs mit der Umfeldwahrnehmung korrekt abgebildet wurde, werden die so generierten Umfeldinformationen genutzt, um das Absicherungsfahrzeug auf dem Seitenstreifen zu bewegen. Im Rahmen des Sicherheitskonzepts ist sicherzustellen, dass durch die Fahrzeugführung nur Trajektorien geplant werden, die das Fahrzeug zum einen innerhalb des definierten Arbeitsumfelds bewegen und die zum anderen unter Berücksichtigung der gegebenen Systemgrenzen (Beschleunigungen, Lenkwinkel etc.) auch fahrbar sind.

Ausgehend von korrekten Steuerbefehlen muss das Sicherheitskonzept deren Umsetzung durch die Aktorik betrachten. Im Falle eines Ausfalls der Elektronik von Lenkung, Bremse oder Antrieb besteht keine Rückfallebene durch den korrigierenden Eingriff eines Fahrers über den mechanischen oder hydraulischen Durchgriff auf die Aktorik. Der Fahrer entfällt somit als redundantes Element im Sicherheitskonzept. Folglich gilt es auch hier bei der Entwicklung des Sicherheitskonzepts Maßnahmen zu finden, die Rückfallebene Mensch geeignet nachzubilden oder durch alternative Strategien zu ersetzen.

Im Referenzprozess der Norm ISO 26262 ist der Entwurf des Sicherheitskonzepts Teil der initialen Projektphase. Zugleich ist das Ende des Prozesses mit der Validierung der Sicherheitsmaßnahmen gekennzeichnet. Entsprechend ist neben der Sicherheitskonzeption auch die Validierung des Sicherheitskonzepts eine der wichtigen technischen Herausforderungen bei der Entwicklung eines fahrerlosen Fahrzeugs. Folglich ist im Projekt aFAS die wesentliche Fragestellung in diesem Zusammenhang, wie Systeme, die in einer offenen Menge von Fahrsituationen betrieben werden sollen, getestet werden können. Als offene Menge wird hier die nicht quantitativ erfassbare Menge an Situationen bezeichnet, die sich durch den fahrerlosen Betrieb im Straßenverkehr im Zusammenhang mit einer Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds ergibt. Dieser Fall wird nach aktuellem Erkenntnisstand im Projektkonsortium in der Norm ISO 26262 nur unzureichend adressiert.

Zwar ist die Menge der Fahrsituationen im Projekt aFAS im Vergleich zu Systemen wie z.B. einem Autobahnchauffeur nach Gasser u. a. (2012) durch die Begrenzung der Einsatzumgebung auf den Seitenstreifen einer Autobahn in Kombination mit einer niedrigen Geschwindigkeit reduziert. Jedoch ist auch bei dem Anwendungsszenario des automatischen Absicherungsfahrzeugs die Menge an Umgebungsbedingungen in Kombination mit Fahrsituationen so groß, dass diese nicht mit vertretbarem Aufwand vollständig erfasst werden kann. Mögliche Lösungsansätze zur Validierung beschäftigen sich mit der Bestimmung des notwendigen Testaufwands, beispielsweise bei Schuldt u. a. (2013) und Schuldt u. a. (2014).

Die Entwicklung der Funktionen des fahrerlosen Absicherungsfahrzeugs erfolgt in Anlehnung an die Norm ISO 26262 (ISO, 2011), die aktuell gültige internationale Norm zur funktionalen Sicherheit von elektronischen Systemen in Kraftfahrzeugen. Es stellt sich dabei grundsätzlich die Frage, inwieweit die Norm für die Entwicklung fahrerloser Fahrzeuge geeignet ist. Im Rahmen des Projekts sollen in Abstimmung mit den beteiligten Industriepartnern Grenzen der Norm ISO 26262 hinsichtlich der Absicherung offener Systeme identifiziert und dokumentiert werden. Weiterhin ist zu klären, wie ein offenes System als „sicher“ definiert werden kann und anhand welcher Metriken sich Sicherheit messen lässt.

Neben den technischen und normativen Fragestellungen erfolgt im Rahmen des Projekts aFAS eine umfassende Betrachtung der rechtlichen Situation für den Betrieb des fahrerlosen Absicherungsfahrzeugs auf dem Seitenstreifen einer Bundesautobahn. Dabei werden hinsichtlich zukünftiger automatisierter Fahrzeuge Ergebnisse erwartet, die über den Anwendungsfall des fahrerlosen Absicherungsfahrzeugs hinaus gehen.

Mit dem Ziel der Erteilung einer Ausnahmegenehmigung für den fahrerlosen Betrieb erfolgt eine Identifikation der Widersprüche des fahrerlosen Betriebs zum geltenden Recht. Ausgehend von den Widersprüchen werden verschiedene Aspekte betrachtet. Im Wesentlichen sind hiervon Haftungs- und Verhaltensrecht betroffen.

Bezüglich des Haftungsrechts werden Aspekte der Produkthaftung, der Gefährdungshaftung sowie der Amtshaftung näher betrachtet. Auf Seiten der Produkthaftung soll geklärt werden, welche zusätzlichen Maßnahmen auf Herstellerseite für den fahrerlosen Betrieb ergriffen werden müssen. Dies zielt vor allem auf die für den fahrerlosen Betrieb notwendigen Instruktionen sowie Informations- und Warnpflichten gegenüber den Nutzern des Systems ab. Weiterhin soll die Rolle des Straßenbetriebsdiensts als Betreiber der Arbeitsstelle hinsichtlich der Gefährdungshaftung untersucht sowie Fragen der Verkehrssicherungspflicht im Rahmen der Amtshaftung geklärt werden. Ein weiterer Fokus liegt hierbei auf der nicht bestimmungsgemäßen Verwendung des Absicherungsfahrzeugs durch Angestellte des Straßenbetriebsdiensts.

Neben den Haftungsfragen stehen derzeit dem Einsatz eines fahrerlosen Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr offene Punkte im Verhaltensrecht entgegen. Folglich wird der fahrerlose Betrieb des Absicherungsfahrzeugs im Rahmen des Projekts aFAS hinsichtlich der Wiener Übereinkunft (United Nations Conference on Road Traffic, 1968) und der Auslegung hinsichtlich ihrer Anpassung (United Nations Economic Commission for Europe, 2014) betrachtet. Daraus werden mögliche juristische Implikationen für das Projekt aFAS aufgezeigt.

Abschließend sollen aus den im Projekt aFAS gewonnenen juristischen Erkenntnissen verallgemeinerungsfähige Aspekte für zukünftige Anwendungsfälle des fahrerlosen Betriebs von Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr heraus gestellt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Projekts aFAS ist der fahrerlose Betrieb eines Absicherungsfahrzeugs für Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf dem Seitenstreifen einer Autobahn. Trotz der niedrigen Geschwindigkeiten und des vergleichsweise einfachen Umfelds ergeben sich für den fahrerlosen Betrieb des Absicherungsfahrzeugs besondere Gefährdungen für den fließenden Verkehr. Entsprechend wird im Rahmen des Projekts ein Sicherheitskonzept in Anlehnung

an die Norm ISO 26262 erarbeitet, wobei parallel in zwei sich ergänzenden Strängen vorgegangen wird. In einem Bottom-up-Ansatz werden bestehende Sicherheitskonzepte für einzelne am Gesamtsystem beteiligte Komponenten analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für den fahrerlosen Betrieb bewertet. Gegebenenfalls erfolgt eine Adaption der bestehenden Konzepte für den fahrerlosen Betrieb. Im parallel verfolgten Top-down-Ansatz wird ein Sicherheitskonzept ohne Berücksichtigung bestehender Ansätze entworfen. Zwischen den beiden Strängen erfolgt im Projektlauf ein regelmäßiger Austausch gewonnener Erkenntnisse.

Durch den erstmaligen Einsatz eines fahrerlosen Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr ergeben sich technische, normative und rechtliche Fragestellungen, die im Kontext der Diskussionen des automatischen Fahrens von hoher Relevanz sind. Bereits identifizierte Fragestellungen wurden in diesem Beitrag vorgestellt und sollen als Grundlage für eine breite Diskussion in der wissenschaftlichen aber auch industriellen Community dienen.

Ziel ist es im Verlaufe des Projekts die Ergebnisse in Form von Leitlinien für die Absicherung fahrerloser Fahrzeuge auch mit wesentlich größerem Funktionsumfang zu generalisieren sowie den weiteren Forschungsbedarf aufzuzeigen.

Literatur

- Bainbridge, L., 1983. Ironies of automation. *Automatica*, Band 19, Ausgabe 6, S. 775–779.
- Gasser, T.M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W., 2012. Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bergisch Gladbach, Deutschland.
- ISO, 2011. ISO 26262: Road vehicles - Functional Safety (Standard No. ISO 26262:2011). International Organization for Standardization, Genf, Schweiz.
- KONVOI, 2009. Verbundprojekt KONVOI: Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektronisch gekoppelten Lkw-Konvois: Abschlussbericht; Berichtszeitraum: 01.05.2005 bis 31.05.2009.
- Nothdurft, T., Hecker, P., Ohl, S., Saust, F., Maurer, M., Reschka, A., Bohmer, J.R., 2011. Stadtpilot: First fully autonomous test drives in urban traffic, in: 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). S. 919–924.
- Ohl, S., 2014. Fusion von Umfeld wahrnehmenden Sensoren in städtischer Umgebung. Shaker Verlag, Aachen.
- Ohl, S., Maurer, M., Häusler, K., Holldorb, C., 2012. Autonomes Fahren im Straßenbetriebsdienst auf Autobahnen. In: AAET2012 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel. Braunschweig.
- Roos, R., Zimmermann, M., Riffel, S.B., Cypra, T., 2008. Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonal in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen. Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven.
- SAE, 2014. Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (J3016).
- Schuldt, F., Saust, F., Lichte, B., Maurer, M., Scholz, S., 2013. Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen. In: AAET2013 - Automatisierungssysteme,

Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel.
Braunschweig.

- Schuldt, F., Lichte, B., Maurer, M., Scholz, S., 2014. Systematische Auswertung von Testfällen für Fahrfunktionen im modularen virtuellen Testbaukasten. In: 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2014, Walting, Deutschland, S. 169–179.
- Singh, S. (Hrsg.), 2008a. Journal of Field Robotics - Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part I, Band 25, Ausgabe 8. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company.
- Singh, S. (Hrsg.), 2008b. Journal of Field Robotics - Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part II, Band 25, Ausgabe 9. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company.
- Singh, S. (Hrsg.), 2008c. Journal of Field Robotics - Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part III, Band 25, Ausgabe 10. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company.
- United Nations Conference on Road Traffic, 1968. 19. Convention on Road Traffic. Wien, Österreich.
- United Nations Economic Commission for Europe, 2014. Consistency between the Convention on Road Traffic (1968) and Vehicle Technical Regulations (No. ECE /TRANS/WP.1/2014/1). Genf, Schweiz.
- Wille, J.M., Saust, F., Maurer, M., 2010. Stadtpilot: Driving autonomously on Braunschweig's inner ring road. In: 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), San Diego, USA, S. 506–511.
- Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.), 2012. Handbuch Fahrerassistenzsysteme Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ; mit 45 Tabellen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, Deutschland.
- Ziegler, J., Bender, P., Lategahn, H., Schreiber, M., Strauss, T., Dang, T., Stiller, C., 2014. Kartengestütztes Automatisiertes Fahren auf der Bertha-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim. In: 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2014, Walting, Deutschland, S. 79–93.