

Methode zur Bewertung der Risikobilanz autonomer Fahrzeuge aus Sicht von Fahrzeughaltern

Yannik Potdevin^{1,2,3}, Dirk Nowotka^{1,3}

Abstract: Wir stellen eine Methode zur Ermittlung der Risikobilanz autonomer Fahrzeuge im Vergleich zu durchschnittlicher menschlicher Fahrleistung vor. Mithilfe unserer Methode werden Fahrzeugtests zur Prüfung von autonomen Fahrzeugen entwickelt und die zugehörigen Testergebnisse bewertet. Im Rahmen von zwei Fallstudien erproben wir unsere Methode und stellen Auszüge der Ergebnisse vor.

Keywords: autonomes Fahren; menschliche Fahrleistung; Risiko; Fahrzeugtest; Fallstudie

1 Einleitung

Am 28. Juli 2021 trat eine Änderung des Straßenverkehrsgesetzes in Kraft, die den Betrieb von Stufe-4-Fahrzeugen bei Erfüllung einiger Zulassungskriterien (insbesondere der Einführung einer technischen Aufsicht) grundsätzlich in bestimmten Bereichen des öffentlichen Straßenverkehrs gestattet.⁴

Mit der Gesetzesänderung entfällt die Notwendigkeit der Anwesenheit eines Begleiters und damit auch dessen Personalkosten im Kontext von gewerblich betriebenen autonomen Fahren. Weit verbreitet unter Ingenieuren und Verkehrsexperten ist auch die Hoffnung, dass durch autonomes Fahren die Sicherheit im Straßenverkehr stark zunimmt. Um beide Vorteile auszuschöpfen, stellt sich für kommerziell agierende Halter von autonomen Fahrzeugen (AF) folgende Frage: Wie ist das Haftungsrisiko einzuschätzen, welches sich durch den Wegfall der Fahrzeugführer vermutlich zum Halter und Hersteller hin verschieben wird (so vermuten es Stöber et al. [SMP19])? Ist der Betrieb von AF tatsächlich sicherer als der Einsatz menschlicher Fahrzeugführer? Hieraus ergibt sich der Bedarf einer für Fahrzeughalter anwendbaren Methode, die Risiken zu vergleichen und zu bewerten, welche jeweils von AF und von durchschnittlicher, menschlicher Fahrleistung ausgehen.

Eine naive Methode ist es, mit dem Fahrzeug eine gewisse Zahl von Kilometern im öffentlichen Verkehr zurückzulegen und die dabei auftretenden Sach- und Personenschäden

¹ Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Informatik, Christian-Albrechts-Platz 4, 24118 Kiel, Deutschland {ypo,dn}@informatik.uni-kiel.de

² Gefördert durch das BMVI-Projekt *Entwicklung und Evaluierung eines ÖPNV-on-demand-Angebots mit autonomen Fahrzeugen im öffentlichen Personennahverkehr in ländlichen Regionen (NAF-Bus)*.

³ Wir danken den anonymen Gutachtern herzlich für ihre konstruktiven Rückmeldungen.

⁴ <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html>.



aufzuzeichnen. Die Anzahl der Schädigungen dividiert durch die Fahrleistung ergibt eine Fehlerrate. Ist diese Fehlerrate gering genug, wäre dies ein Argument für den Einsatz des AF. Was jedoch ist genug? Im Bericht der Ethikkommission [Et17] besagt die zweite Regel, dass die Einführung von automatisierten Systemen nur vertretbar sei, wenn sie im Vergleich zu menschlichen Fahrleistungen zumindest eine Verminderung von Schäden im Sinne einer positiven Risikobilanz verspreche. Eine notwendige (aber nicht hinreichende) Bedingung ist daher, dass die Schadensrate des AF geringer ist als die eines durchschnittlichen menschlichen Verkehrsteilnehmers.

Eine Ausprägung von Personenschäden ist das tödliche Verunglücken von Fahrzeugbenutzern im Straßenverkehr in Deutschland. Bäumer et al. [Bä17] schätzen die Verunglücktenrate in Deutschland im Jahr 2014 auf durchschnittlich 3 Personen pro 10^9 Fahrzeugkilometer. Dies interpretieren wir als das durchschnittliche Risiko menschlicher Fahrleistung (beschränkt auf das tödliche Verunglücken). Um statistisch signifikant nachzuweisen, dass ein AF beispielsweise 90 % weniger riskant ist, müsste dieses Fahrzeug circa 10^{10} km im typischen Straßenverkehr zurücklegen, ohne dabei einen einzigen Menschen tödlich zu verletzen (gemäß Kalra; Paddock [KP16, Gleichung (2)]). Ein Risikovergleich dieser Art ist unpraktikabel.

In dieser Arbeit schlagen wir daher als praktikable Alternative vor, aus der Straßenverkehrsunfallstatistik (StVU) hergeleitete Gefährdungssituationen bewusst herbeizuführen – statt aktiv mit Fahrzeugen Fahrleistung zu erbringen und das Eintreten solcher Situationen abzuwarten. Wir gestalten Gefährdungssituationen als Fahrzeugtests. Besteht ein AF einen solchen, zählt dies als positiver Risikobilanzbeitrag des AF. Anderenfalls zählt dies als negativer Risikobilanzbeitrag. Überwiegen negative Risikobilanzbeiträge, ist eine insgesamt positive Risikobilanz ausgeschlossen und die Haltung des Fahrzeugs abzulehnen.

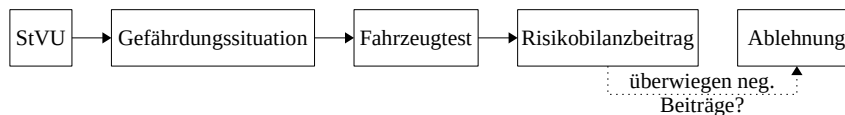


Abb. 1: Unsere Methode zur Bewertung der Risikobilanz autonomer Fahrzeuge.

Die Hauptbeiträge (visualisiert in Abbildung 1) dieser Arbeit sind:

1. Methode zur Erstellung von Fahrzeugtests für Halter von autonomen Fahrzeugen
2. Methode zur Bewertung der Resultate obiger Fahrzeugtests

Zusätzlich geben wir ausgewählte, aus der obigen Methode hervorgegangene Fahrzeugtests an und führen die im Rahmen von zwei Fallstudien entstandenen Testergebnisse, einschließlich ihrer Bewertung, auf. Eine ausführliche Beschreibung, weitere Tests, Ergebnisse und Bewertungen sind in einem technischen Bericht, auf dem dieser Beitrag basiert, enthalten (siehe Potdevin; Nowotka [PN21]).

2 Methode

Zweck und Abgrenzung Zurzeit mangelt es Fahrzeughaltern an ausreichender Erfahrung mit autonomen Fahrzeugen, insbesondere hinsichtlich der Verkehrssicherheit aktueller Modelle. Sie sind überwiegend auf die Aussagen der Hersteller zur Beurteilung der Verkehrssicherheit angewiesen. Wir schlagen eine Methode vor, mit der sich Fahrzeughalter selbst eine Meinung zu der Risikobilanz autonomer Fahrzeuge bilden können. Da unsere Methode auf Fahrzeugtests setzt, ist keine Kenntnis des inneren Aufbaus des Fahrzeugs und auch kein Zugriff auf den inneren Aufbau nötig. Somit wird sie anwendbar für Fahrzeughalter. Um den Aufwand der Methode für Fahrzeughalter zu begrenzen, erlauben wir an einigen Stellen Freiheitsgrade, beziehungsweise verzichten auf übliche Formalitäten der systematischen Risikoanalyse und Testdurchführung. Da Fahrzeughersteller größeren Sorgfaltspflichten unterliegen, empfehlen wir diesen die Nutzung anderer Methoden.

Unsere Methode basiert primär auf Fahrzeugtests. Jede Art von Test hat die Eigenschaft, dass damit nur die Anwesenheit eines Fehlers gezeigt werden kann – nicht die Abwesenheit. Übertragen auf unsere Methode bedeutet dies: Nur aus einem Überhang an negativen Risikobilanzbeiträgen ist zu schließen, dass die Risikobilanz insgesamt negativ ist (Ablehnung aussprechen). Überwiegen hingegen die positiven Beiträge, folgt nicht unmittelbar eine positive Risikobilanz, sondern es bleibt eine Einzelfallentscheidung des Halters, ob das Vertrauen in das autonome Fahrzeug genügt, um ihm eine insgesamt positive Risikobilanz zuzusprechen.

Straßenverkehrsunfallsstatistik und Gefährdungssituation Die Straßenverkehrsunfallsstatistik beinhaltet Angaben zu Unfällen, Beteiligten, Fahrzeugen, Verunglückten und Unfallursachen. Ihr Zweck ist es, bundesweit vergleichbare Daten zum Straßenverkehrsunfallgeschehen zu erfassen [De17].

Die auf Fehler der Fahrzeugführer und die Unfallumgebung beschränkten Unfallursachen der Straßenverkehrsunfallsstatistik verwenden wir als Grundlage, um durch Brainstorming Gefährdungssituationen (siehe [IS11, Teil 1, Def. 1.59]) zu ermitteln, die zu Unfällen eben solcher Ursachen führen können. Andere Unfallursachen, etwa die Verkehrstüchtigkeit des Fahrzeugführers betreffend, betrachten wir mangels Übertragbarkeit auf autonome Fahrzeuge nicht. Die Ergebnisse, in Auszügen zu finden in Tabelle 1, sind daher Gefährdungssituationen, welche für die durchschnittliche menschliche Fahrleistung ein gewisses Risiko bergen. In diesen Gefährdungssituationen muss ein autonomes Fahrzeug im Vergleich bestehen, damit eine Chance auf eine positive Risikobilanz noch besteht. Schließlich bergen *nur* für autonome Fahrzeuge relevante Gefährdungssituationen (die per Konstruktion nicht aus der Straßenverkehrsunfallsstatistik von 2014 herleitbar sind) kein Risiko für die durchschnittliche menschliche Fahrleistung. Gefährdungssituationen, die nur für autonome Fahrzeuge gelten, leiten wir in dieser Arbeit nicht her, weil wir uns auf die StVU als Quelle beschränken. Die

hier vorgestellten Gefährdungssituationen führen daher zu einem das autonome Fahrzeug bevorzugenden Vergleich.⁵

Tab. 1: Aus den Unfallursachen der Straßenverkehrsunfallstatistik abgeleitete Betriebssituationen und Gefährdungssituation, die für beide Untersuchungsgegenstände (autonomes Fahrzeug und menschliche Fahrleistung) anwendbar sind. Der Einfachheit halber erfolgt die Beschreibung aus Sicht des autonomen Fahrzeugs. UNr. entspricht Unfallursachenummer, *En* entspricht Häufigkeitsklasse und *Sn* entspricht Schweregrad.

UNr.	Betriebssituation	<i>En</i>	Gefährdungssituation	<i>Sn</i>	ASIL
15	Dem Fahrzeug fährt ein anderer Verkehrsteilnehmer unmittelbar hinterher.	E4	Das autonome Fahrzeug veranlasst ohne zwingenden Grund eine starke Bremsung. Es könnte zu einem Zusammenstoß mit dem Hinterherfahrenden kommen.	S1	B
23	Das Fahrzeug wird (von einem anderen Verkehrsteilnehmer) überholt.	E3	Beim Überholtwerden veranlasst das autonome Fahrzeug ein fehlerhaftes Manöver (d. h. sie weicht vom Grundsatz »Spur und Geschwindigkeit halten« in potentiell schädlicher Weise ab). Es könnte zu einem Zusammenstoß mit dem Überholenden kommen. Außerdem könnte das fehlerhafte Manöver dazu führen, dass der Überholende mit Dritten oder Hindernissen kollidiert.	S2	B
36	Das Fahrzeug wendet oder fährt rückwärts.	E4	Das autonome Fahrzeug veranlasst ein fehlerhaftes Manöver beim Wenden oder Rückwärtsfahren (beispielsweise missachtet sie die Gebote in §9 StVO). Es könnte zu einem Zusammenstoß mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Hindernissen kommen.	S1	B
39	Das Fahrzeug ist im Begriff eine Fußgängerfurt zu kreuzen, an/auf der sich ein Fußgänger befindet.	E4	Das autonome Fahrzeug veranlasst falsches Verhalten gegenüber Fußgängern an Fußgängerfurten. Es könnte zu einem Zusammenstoß mit Fußgängern kommen.	S2	C

Der nächste Schritt ist es, das einer Gefährdungssituation zugehörige ASIL (siehe [IS11, Teil 1, Def. 1.6]) zu bestimmen. Hierfür benötigen wir drei Parameter: die Beherrschbarkeit der Gefährdungssituation, den Schweregrad der Gefährdungssituation und Häufigkeit der Betriebssituation (siehe [IS11, Teil 1, Def. 1.19, 1.120, 1.37 & 1.83]), welche der Gefährdungssituation zugrunde liegt.

Die Beherrschbarkeitsklasse setzen wir pauschal und pessimistisch auf C3, weil ein Fahrgast

⁵ Hinweis: Die nicht betrachteten Gefährdungssituationen erhielten gemäß unserer Methode (siehe unten) stets das ASIL QM. Autonome Fahrzeuge können in jenen Fällen keine positiven Risikobilanzbeiträge erzielen – bestenfalls neutrale (siehe Abbildung 2).

eines autonomen Fahrzeugs des SAE-Automatisierungsgrades [On18] 4 oder 5 explizit von dessen Steuerung und Überwachung entbunden ist.

Den Schweregrad leiten wir aus der Straßenverkehrsunfallstatistik ab. Zu einer Gefährdungssituation kennen wir die motivierende Unfallursache. Durch eine Analyse der StVU ist uns die Zahl der in Unfällen dieser Ursache leichtverletzten, schwerverletzten und getöteten Personen bekannt. Die relativen Anteile an unverletzten, leichtverletzten, schwerverletzten und getöteten Personen zu einer Unfallursache interpretieren wir als die Wahrscheinlichkeit, bei einem Unfall dieser Ursache entsprechend zu verunglücken. Liegt die Wahrscheinlichkeit bei einem Unfall einer bestimmten Ursache zu sterben bei mindestens 10 %, weisen wir gemäß ISO 26262 [IS11, Teil 3, Anhang B] der Unfallursache, und damit auch der abgeleiteten Gefährdungssituation, den Schweregrad S3 zu. Ist die Wahrscheinlichkeit getötet zu werden geringer als 10 %, aber die Wahrscheinlichkeit für eine schwere Verletzung mindestens 10 %, ergibt sich der Schweregrad S2. Ist der Schweregrad weder S3 noch S2 und liegt die Wahrscheinlichkeit einer leichten Verletzung bei mindestens 10 %, folgt der Schweregrad S1. An anderen Fällen (also bei einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 90 % unverletzt zu bleiben) erhält die Gefährdungssituation den Schweregrad S0.

Für die Ermittlung der Häufigkeit einer Betriebssituation, welche einer Gefährdungssituation zugrunde liegt, bedienen wir uns der VDA-Empfehlung 702 [Ve15], denn dort sind bereits zahlreiche Betriebssituationen samt Häufigkeitsklasse aufgeführt. Für Betriebssituationen, die nicht in der ISO 26262 aufgeführt sind, suchen wir Betriebssituationen heraus, welche unserer Einschätzung nach ähnlich häufig vorkommen und übernehmen anschließend deren Häufigkeitsklasse. Aus der Kombination der drei Parameter ergibt sich schließlich das entsprechende ASIL.

Berechnung des Schweregrades einer Gefährdungssituation aus der StVU Den Schweregrad einer Gefährdungssituation leiten wir aus der StVU⁶ ab. Die Gefährdungssituation ergibt sich jeweils aus einer Unfallursache der StVU. Zu jedem polizeilich erfassten Unfall werden, soweit feststellbar, Unfallursachen aufgezeichnet. Für den Unfall als solchen können bis zu zwei allgemeine Unfallursachen erfasst werden. Hinzu kommen pro beteiligter (siehe [De16, S. 12]) Person bis zu drei personenbezogene Fehlverhalten. Weiterhin wird pro Unfall die Anzahl der getöteten, der schwerverletzten und der leichtverletzten Personen notiert. Pro Unfallbeteiligtem wird zusätzlich dessen Unfallfolge (un-, leicht-, schwerverletzt oder getötet), die Zahl der Verletzten, beziehungsweise getöteten Mitfahrer und die Zahl der Benutzer des Fahrzeugs des Beteiligten verzeichnet. Um nun den Schweregrad einer Gefährdungssituation zu ermitteln, gehen wir grob wie folgt vor (für Details siehe [PN21] oder <https://github.com/ypotdevin/severity-unfallstatistik>): Zuerst schränken wir die Daten auf Unfälle ein, bei denen der Hauptverursacher ein Fahrzeug eines Typs führt, der vermutlich in der Zukunft voll automatisierbar ist (Betrachtung relevanter Fahrzeuge).

⁶ Quelle: FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Straßenverkehrsunfälle, 2014, eigene Berechnungen.

Dann berechnen wir pro Unfall eine untere Schranke für die Zahl der durch diesen Unfall gefährdeten Verkehrsteilnehmer. Als nächstes berechnen wir pro Gruppe von Unfällen mit gemeinsamer Ursache die relativen Häufigkeiten der Leichtverletzten, der Schwerverletzten und der Getöteten im Verhältnis zu den Gefährdeten. Diese relativen Häufigkeiten interpretieren wir als die Wahrscheinlichkeit, bei einem Unfall der gerade betrachteten Ursache eine der jeweiligen Unfallfolgen zu erleiden und weisen dann, wie oben beschrieben, dieser Ursache den passenden Schweregrad zu.

Da unverletzte Fußgänger nicht in der StVU erfasst werden, gehen sie nicht in die oben berechnete Zahl der durch einen Unfall gefährdeten Personen ein. Die Anzahl der tatsächlich gefährdeten Personen wird damit systematisch unterschätzt (dies ist der Grund für die Formulierung »untere Schranke«), was jedoch hinnehmbar ist, da so die oben berechneten Wahrscheinlichkeiten überschätzt werden (vergleiche [IS11, Klausel 7.4.3.1, Notiz]).

Testerstellung und -bewertung Da Gefährdungssituationen Situationen beschreiben, die auf Ebene des Fahrzeugs zu beobachten sind (im Vergleich zur System- oder Komponentenebene), prüfen wir das Fahrzeugverhalten mittels Fahrzeugtests. Die Tests sind so konzipiert, dass sie die jeweilige Gefährdungssituation realistisch abbilden und in Kernpunkten vergleichbar sind. Jedoch erlauben wir explizit einige Freiheitsgrade um einerseits den Testaufwand zu reduzieren und um andererseits der Dynamik und Unschärfe des öffentlichen Verkehrs gerecht zu werden. Exakt reproduzierbar ist ein konkreter Testdurchlauf daher nicht. Eine Übersicht ausgewählter Testfälle ist in Tabelle 2 zu finden (weitere in [PN21]).

Nun beschäftigen wir uns mit der Bewertung der Testergebnisse. Abhängig von dem ASIL des Testfalls (welches sich aus der Gefährdungssituation ergibt), bewerten wir das Bestehen (beziehungsweise das Fehlschlagen) eines Tests unterschiedlich. Unsere Motivation dafür ist, ein ASIL als Aufforderung zur Risikoreduktion zu betrachten. Daraus schließen wir: Ist die menschliche Fahrleistung mit einem hohen ASIL bewertet, geht von ihr ein zu hohes Risiko aus. Ist sie mit dem ASIL QM bewertet, ist das Risiko akzeptabel. Bezüglich des Vergleichs von durchschnittlicher menschlicher Fahrleistung und der Fahrleistung autonomer Fahrzeuge legen wir fest: Besteht das autonome Fahrzeug einen Test mit dem ASIL D, das heißt ein Szenario welches mit maximaler Risikoreduktionsaufforderung für die durchschnittliche menschliche Fahrleistung verknüpft ist, gilt dies als Risikobilanzbeitrag zugunsten des autonomen Fahrzeugs (positiv). Fällt das autonome Fahrzeug bei einem ASIL-QM-Test durch, also bei einem Szenario ohne Risikoreduktionsaufforderung, ist der Risikobilanzbeitrag zulasten des autonomen Fahrzeugs (negativ). Als neutrale Beiträge definieren wir das Bestehen eines ASIL-QM-Testfalls und das Fehlschlagen eines ASIL-D-Testfalls.

Weniger eindeutig ist die Bewertung in den übrigen sechs Fällen. Wird ein Testfall mit ASIL-C statt ASIL-D bewertet, ist die Risikoreduktionsanforderung eine Größenordnung geringer. Dies gilt auch für die Abstufungen von ASIL-C auf ASIL-B und ASIL-B auf ASIL-A. Das von der durchschnittlichen menschlichen Fahrleistung ausgehende Risiko

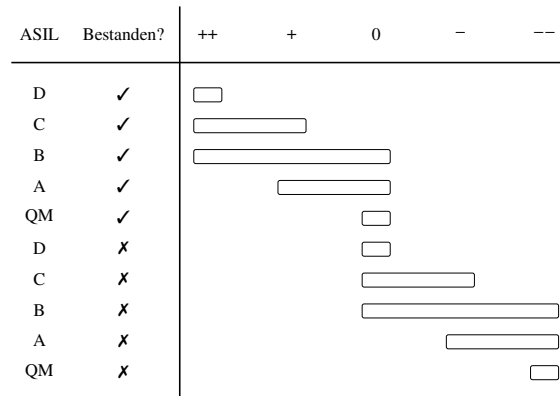


Abb. 2: Beiträge zur Risikobilanz in Abhängigkeit davon, wie ein Test des autonomen Fahrzeugs ausgeht und welches ASIL dem Test zugeordnet ist. Dabei ist (++) ein positiver Beitrag, (+) ein eher positiver Beitrag, (0) ein neutraler Beitrag, (-) ein eher negativer Beitrag und (--) ein negativer Beitrag. Die breiten Intervalle deuten, im Vergleich zu den Punkten, den Bewertungsspielraum an.

nimmt folglich mit jeder Stufe deutlich ab. Ein Vergleich, der nur auf der Prüfung des Bestehens oder Nichtbestehens basiert, erfasst diese Abstufungen nicht genügend. Wir berücksichtigen diesen Umstand, indem wir in solchen Fällen den Risikobilanzbeitrag nicht mehr punktgenau beziffern, sondern einen Ermessensspielraum schaffen, der im Einzelfall zu betrachten ist. Dies haben wir in Abbildung 2 mithilfe von breiten Intervallen dargestellt. Besteht beispielsweise das autonome Fahrzeug einen ASIL-C-Test, schätzen wir dies weder als negativ, noch als nur neutral ein. Ob dies jedoch als eindeutig positiv, oder nur als bedingt positiv zu werten ist, hängt vom Einzelfall ab. Deshalb bewerten wir so einen Fall als eher positiv bis positiv. Für das Bestehen eines ASIL-B-Tests schließen wir lediglich einen negativen Beitrag aus und lassen offen, ob oder wie positiv dies ist. Beim Bestehen eines ASIL-A-Tests schließen wir zusätzlich auch noch einen eindeutig positiven Bilanzbeitrag aus, weil wir hier davon ausgehen, dass das von der durchschnittlichen menschlichen Fahrleistung ausgehende Risiko nicht mehr ausreichend hoch ist, um dem autonomen Fahrzeug einen deutlichen Vorsprung im Risikovergleich zuzusprechen. Für das Fehlschlagen bei Tests mit ASIL-Bewertung A–C führen Symmetrieüberlegungen und obige Argumente zu den in Abbildung 2 aufgeführten Bewertungen.

An dieser Stelle weisen wir auf die folgende diskussionswürdige Designentscheidung unsererseits hin. Bei der Ermittlung von ASIL wird zwar der Schweregrad einer Gefährdungssituation und die Häufigkeit der ihr zugrunde liegenden Betriebssituation berücksichtigt, nicht jedoch wie häufig sich die Unfallfolgen tatsächlich manifestieren. Vergleichen wir nun die durchschnittliche menschliche Fahrleistung mit einem autonomen Fahrzeug in einer konkreten Gefährdungssituation, und ziehen aus wenigen Testausführungen Schlüsse, so nehmen wir implizit zwei Dinge an. Erstens: Die Manifestierungshäufigkeit sei bei beiden Parteien gleich. Zweitens: Je höher das ASIL, desto höher die Manifestierungshäufigkeit.

Wird mindestens eine dieser Annahmen verletzt, sinkt auch die Aussagekraft eines Testergebnisses. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken ist es, die Testdurchführungszahl zu erhöhen und menschliche Fahrer genauso häufig als Kontrollgruppe den Test absolvieren zu lassen. Dieses Vorgehen ist sicherlich sinnvoll, liegt aber außerhalb des Fokus für diese Arbeit.

Zum Schluss stellen wir uns die Frage, wie aus den einzelnen Risikobilanzbeiträgen eine Gesamtbilanz, beziehungsweise ein Gesamtbild zu destillieren ist. Eine naheliegende Idee ist das paarweise Verrechnen ausgewählter Risikobilanzbeiträge miteinander; etwa das Bestehen eines ASIL-D-Tests mit dem Fehlschlagen eines ASIL-QM-Tests. Eigentlich ist das Ziel der Ermittlung der Risikobilanz herauszufinden, ob autonome Fahrzeuge im Vergleich zur durchschnittlichen menschlichen Fahrleistung insgesamt weniger Personenschäden verursachen, also ob sich Fahrzeughalter für autonomes Fahren und gegen menschliche Fahrzeugführer entscheiden sollen. Das heißt um eine paarweise Aufrechnung zu rechtfertigen, müsste bekannt sein, in welchem Umfang Personenschäden durch das Bestehen des einen Testfalls vermieden werden und auch in welchem Umfang zusätzliche Personenschäden durch das Fehlschlagen eines anderen Testfalls zu erwarten sind. Unsere Methode bietet für keinen der beiden Fälle geeignete Maße. Daher geben wir hier keine Prinzipien für die paarweise Aufrechnung an und verweisen auf die Einzelfallbetrachtung. Um dennoch ein grobes Gesamtbild zu erhalten, welches uns in eindeutigen Fällen ermöglicht zu entscheiden, ob die notwendige Bedingung der positiven Risikobilanz vom untersuchten Fahrzeug verletzt wird oder erfüllt werden kann, schlagen wir folgendes vor: Alle Risikobilanzbeiträge werden gruppiert, gezählt und in einem Histogramm dargestellt. Machen die negativen Beiträge mindestens die Hälfte aller Beiträge aus, so gehen wir davon aus, dass die Gesamtbilanz negativ ist. Die notwendige Bedingung gilt als verletzt. Ist die Zahl der negativen Beiträge null, oder subjektiv vernachlässigbar, stehen die Chancen für eine positive Gesamtbilanz gut (dies ist jedoch noch kein Nachweis). In den übrigen Fällen bleibt uns vorerst nur die Einzelfallentscheidung.

3 Fallstudien

Aus den gefährlichen Situationen in Tabelle 1 leiten wir Testfälle ab, die wir am Beispiel eines Fahrzeugs des Modells EZ10 von Easymile SAS und auch am Beispiel eines Fahrzeugs des Modells ARMA von Navya SA durchführen (für Fahrzeugdetails siehe [PN21]). Die vom EZ10 autonom befahrbare Strecke befindet sich auf dem Privatgelände der GreenTEC Campus GmbH, die zum ARMA gehörige Strecke befindet sich in Keitum auf Sylt (öffentlicher Straßenverkehr).

Die in Tabelle 2 aufgeführten Testszenarien erläutern wir kurz in der folgenden Aufzählung.

- 7 Das Fahrzeug stößt einmal beim Linksabbiegen und auch beim Rechtsabbiegen auf eine Fußgängerfurt. Beide Fälle werden in zwei Varianten geprüft – je eine pro Seite von welcher der Fußgänger die Furt überquert. Die Begegnung des Fahrzeugs und

- des Fußgängers wird so koordiniert, dass sie sich (nacheinander) an fünf definierten Punkten (je mit einem Meter Abstand zueinander) auf der Fußgängerfurt treffen. Der mittlere der fünf Punkte ist der, wo die Fahrspur des Fahrzeugs auf die Laufspur des Fußgängers trifft.
- 10 Das Fahrzeug wird von verschiedenen Verkehrsteilnehmern (Pkw oder Fahrrad / E-Roller) in verschiedenen Geschwindigkeiten (50 km h^{-1} , 30 km h^{-1} und 20 km h^{-1}) mit verschiedenen seitlichen Abständen (2 m, 1,5 m, 1 m und 0,5 m) überholt. Nicht jede Kombination wird geprüft; beim Pkw nur die schnelleren Geschwindigkeiten und beim Fahrrad / E-Roller nur die kürzeren Abstände.
 - 17 Laub und Müll (2 Varianten) wird einen Meter vor dem Fahrzeug aufgewirbelt. Ein menschlicher Fahrer würde deshalb keine starke Bremsung einleiten.
 - 18 Das Fahrzeug steht an einem fixierten Ausgangspunkt. Vor, beziehungsweise hinter dem Fahrzeug wird ein Bereich eingezeichnet, wo an ausgewählten Stellen Hindernisse platziert werden (immer nur eines zurzeit). In einer Variante ist ein Leitkegel das Hindernis, in einer anderen eine Person. In einer weiteren Variante geht eine Person auf Halbkreisen hin und her – sowohl vor, als auch hinter dem Fahrzeug.

Bei unseren Fallstudien war es wegen der geringen Geschwindigkeit der Testfahrzeuge unbedenklich, echte Menschen als Fußgänger einzusetzen.

Beobachtungen & Bewertung In Tabelle 3 sehen wir die einzelnen, während der Testfälle ermittelten Risikobalanzeinträge der Fahrzeuge (für eine Aggregation aller gesammelter Beiträge, siehe [PN21]). Die Verteilung der einzelnen Risikobalanzeinträge ist sowohl beim EZ10 von Easymile, also auch beim ARMA von Navya, gemäß Abschnitt 2 nicht eindeutig. Daher bewerten wir beide Fälle individuell.

Die deutliche Mehrheit, 32 von 41, aller Risikobalanzeinträge (nicht nur die hier gezeigten) des EZ10 ist nicht negativ, 19 davon sogar strikt positiv. Lediglich 6 von 41 sind strikt negativ und bei den übrigen drei Beiträgen besteht noch Unsicherheit (die drei $[0, -]$ Beiträge). Bei den strikt negativen Beiträgen zeigt sich jedoch eine große Schwäche des EZ10: Das Fahrzeug besaß zum Zeitpunkt des Tests nicht die Fähigkeit beim Detektieren eines Objekts mit seinen Sensoren die Natur des Objekts einzuschätzen. Ob es nun ein Verkehrsteilnehmer, Müll, Laub, ein Insekt oder auch nur ein zu hoher Grashalm ist – gerät es zu nahe ans Fahrzeug, wird ein der Nähe dementsprechend starkes Bremsmanöver ausgelöst. Da diese Schwäche systematisch ist, wiegen unserer Ansicht nach die positiven Beiträge die negativen nicht auf. Wir kommen zu dem Schluss, dass die notwendige Bedingung einer positiven Gesamtrisikobalanze durch den EZ10, zumindest mit der damaligen Version der Steuerungssoftware, nicht erfüllt wird. Der EZ10 ist damit (noch) nicht bereit für eine vorbehaltlose Zulassung für den öffentlichen Straßenverkehr.

Tab. 2: Die aus den gefährlichen Situationen in Tabelle 1 (vergleiche Unfallursachennummer UNr.) abgeleiteten Testfälle, beschrieben durch den Prüfgegenstand und das zu erwartende Ergebnis.

UNr.	TNr.	Prüfgegenstand	Erwartetes Ergebnis
15	17	Bremst das Fahrzeug in einer Verkehrssituation, die kein (starkes) Bremsen erfordert, unverhältnismäßig stark?	Es sollte zu keinem Bremsvorgang kommen. Falls doch, ist dieser in seiner Intensität verhältnismäßig.
23	10	Wie verhält sich das Fahrzeug beim Überholtwerden? (Fokus auf seitl. Abstände)	Beim Überholtwerden hält das Fahrzeug die Spur und die Geschwindigkeit.
36	18	Das Fahrzeug steht. Verschiedene stillstehende oder sich bewegende Objekte werden auf verschiedenen Punkten vor oder hinter dem Fahrzeug platziert. Erkennt das Fahrzeug beim Anfahren alle Objekte und reagiert angemessen?	In allen Fällen erkennt das Fahrzeug die Objekte und verweigert die Anfahrt, bzw. kommt nach Anfahrt rechtzeitig wieder zum Stehen.
39	7	Wie verhält sich das Fahrzeug gegenüber Fußgängern auf Fußgängerfurten?	Droht eine Kollision des Fahrzeugs mit dem Fußgänger, soll es Bremsmanöver einleiten, um einen Abstand zum Fußgänger in Länge des Anhaltewegs, mindestens jedoch in Länge des Gefahrenanhaltewegs zu erzwingen. Droht hingegen keine Kollision, soll der Fußgänger nicht behindert oder belästigt werden.

Auch beim ARMA ist die Mehrheit (28 von 34) der Risikobilanzbeiträge nicht negativ, 16 davon strikt positiv. Fünf Beiträge sind strikt negativ, zwei davon deutlich. Jene beiden rühren daher, dass das Fahrzeug in manchen Konstellationen große Schwierigkeiten damit hat, durch seine Sensoren einen Leitkegel zu erkennen. Selbst wenn es einen solchen erkennt, und kurz vor dem Kontakt mit ihm stoppt, nimmt es oftmals unmittelbar danach die Fahrt wieder auf und fährt den Leitkegel an oder überfährt ihn. Die Tatsache, dass das Fahrzeug solch nicht zu vernachlässigende Objekte des Straßenverkehrs nicht zuverlässig erkennt, gepaart damit, dass das Fahrzeug nicht erkennt, dass gerade eine Kollision stattfindet, lässt uns zu dem Schluss kommen, dass die mehrheitlich positiven Beiträge die wenigen, jedoch stark ausgeprägten negativen Beiträge nicht aufwiegen. Daher können wir auch hier die notwendige Bedingung einer positiven Gesamtrisikobilanz durch den ARMA mit der damaligen Version der Steuerungssoftware nicht als erfüllt betrachten. Nicht von dieser Einschätzung berührt wird der prototypische Einsatz unter besonderen Sicherheitsvorkehrungen, wie etwa stark begrenzter Geschwindigkeit und dem Einsatz eines Operators.

4 Diskussion

Ein Vorteil unserer Methode ist, dass sie auf Fahrzeugtests basiert. Es ist daher kein Wissen über den Aufbau und die Implementierung einzelner Komponenten nötig. Auch sind

Tab. 3: Die wichtigsten Beobachtungen aus dem Testbetrieb der Fahrzeuge EZ10 von Easymile auf dem GreenTEC Campus und dem ARMA von Navya auf Sylt, aufgeschlüsselt nach Testszenario (TNr.), vergleiche auch Tabelle 2. TE steht für Testergebnis und RB für Risikobilanzbeitrag.

TNr.	Fhz.	Beobachtungen	TE	RB
7	EZ10	Stand der Fußgänger im Weg, kam das Fahrzeug stets mit 1,5 m bis 2 m Abstand zum Stillstand. Meistens geschah dies auch durch wohlndosiertes Bremsen. In einem Fall fiel das Bremsmanöver jedoch sehr stark aus, sodass Passagiere leicht gefährdet wurden – das Abstand zum Fußgänger betrug jedoch immer noch 1 m bis 1,5 m. Stand der Fußgänger nicht im Weg, fuhr das Fahrzeug an ihm vorbei.	4 · ✓	3 · ++, +
10	EZ10	Wurde das Fahrzeug mit 2 m Seitenabstand von einem Pkw überholt, änderte es sein Fahrverhalten nicht. Wurde es mit 1 m bis 1,5 m Abstand überholt, unabhängig davon ob mit Pkw oder E-Roller, verringerte es seine Geschwindigkeit mäßig stark. Beim Überholen mit nur 0,5 m Abstand, löste das Fahrzeug eine Vollbremsung aus.	2 · ✓, 5 · ✗	2 · [+ , 0], 0, 3 · [0, -], –
17	EZ10	Dicht (ca. 1 m) vor das Fahrzeug geworfener Müll und Laub, sowie dicht vor dem Fahrzeug aufgewirbelter Müll, lösten eine Vollbremsung aus.	2 · ✗	2 · –
18	ARMA	In den 4 Varianten in denen es galt eine Person zu erkennen (stillstehend oder auch in Bewegung), schnitt das Fahrzeug insgesamt gut ab und erkannte die Personen rechtzeitig (kam zum Teil jedoch sehr nahe heran). Bei der Erkennung eines Leitkegels hingegen kam es vorwärts- und rückwärts-fahrend einige Male zu Zusammenstößen (zum Teil fuhr das Fahrzeug sogar trotz physischen Kontakts weiter).	4 · ✓, 2 · ✗	2 · +, 2 · [+ , 0], 2 · –

spezielle Testgeräte und -aufbauten unnötig. So ist unsere Methode für den Fahrzeughalter anwendbar. Dem entgegen steht, dass gewisse Fehler so vermutlich nicht aufgedeckt werden.

Der Umfang, die Komplexität und die Anzahl der Fahrzeugtests ist allein durch den Anwender bestimmt. Die Folge ist ein schlanker Prüfprozess. Der Anwender muss selbst einschätzen, ob die Testabdeckung genügt. Besonders bedacht werden sollte, ob ein Testszenario einmalig oder mehrmalig durchlaufen werden müsse. Wird ein Test lediglich einmalig durchlaufen bleibt die Frage, ob das Testergebnis nur auf die Fähigkeiten des Fahrzeugs zurückzuführen ist, und nicht etwa durch Störfaktoren, oder gar durch Zufall beeinflusst wurde.

Je nach ASIL der Gefährdungssituation nimmt unsere Methode bereits einen Teil der Interpretation ab und fordert nur in uneindeutigen Fällen eine Einzelfallbetrachtung. Leider treten die uneindeutigen Fälle, jene mit dem ASIL B, häufig auf – eindeutige Fälle wie jene mit ASIL D oder QM kommen dagegen selten vor (siehe [PN21]). Außerdem vermuten wir, dass die Verteilung der einzelnen Risikobilanzbeiträge selten so eindeutig ausfällt, dass ohne Einzelfallbetrachtung eine Aussage zur Gesamtbilanz getroffen werden kann.

5 Verwandte Arbeiten und Ausblick

Um ein autonomes Fahrzeug zu testen, bieten sich auf der einen Seite Komponententests an, welche essentielle Bestandteile isoliert überprüfen. Auf der anderen Seite bieten sich Fahrzeugtests an, welche das Gesamtsystem Fahrzeug überprüfen [Sc20]. Fahrzeugtests, auf Testfeldern oder in der Praxis, genießen im Allgemeinen eine höhere Validität gegenüber Komponententests [EZ13], sind jedoch aufwendiger in ihrer Umsetzung. Eine Zwischenform stellen Simulationen dar (*software in the loop*), welche insbesondere in der Fahrzeugentwicklung eingesetzt werden [Fe21; Tu18]. Eine Übersicht hierzu bieten Huang et al. [Hu16] und Alvarez et al. [Al17].

Die StVU nutzen wir als Referenz für kritische Verkehrssituationen, um Gefährdungssituationen zu erkennen und damit der Testkonzeption einen Rahmen zu geben. Die Unfallstatistik basiert auf polizeilich erfassten Verkehrsunfällen. Gambi et al. [GHF19] verwenden direkt die Unfallberichte um Gefährdungssituationen zu simulieren.

In unserer Arbeit bewerten wir die Risikobilanz von autonomer Fahrleistung mit nahezu rein menschlicher Fahrleistung (StVU 2014). Dieser Vergleich ist prototypisch und entspricht so dem Wortlaut der Regel 2 des Berichts der Ethikkommission. Er berücksichtigt jedoch nicht die Risikoreduktion, welche bereits jetzt auf vorhandene Fahrerassistenzsysteme – das heißt Teilautomatisierung – zurückzuführen ist. Bei der Einführung fortgeschrittener autonomer Fahrfunktionen, bis hin zum vollautonomen Fahrzeug, sollte deren Risikobilanz im Vergleich zur menschlichen Fahrleistung *inklusive* gängiger Fahrerassistenzsysteme aufgestellt werden. Damit würde sich das Vergleichsobjekt menschliche Fahrleistung stetig verändern. Wir vermuten, dass das hiervon ausgehende Risiko im Laufe der Zeit abnimmt, was zur Folge hätte, dass die Sicherheitsanforderungen an zuzulassende autonome Fahrfunktionen stetig steigen würden (ansonsten wäre deren Risikobilanz nicht mehr positiv). Unsere Methode ist in der Lage diese Entwicklung abzubilden, indem die ASIL-Bewertung der gefährlichen Situationen stets mit aktuellen Unfallstatistiken durchgeführt wird.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit stellten wir eine Methode vor, mit der die Risikobilanz von autonomen Fahrzeugen im Vergleich zur durchschnittlichen menschlichen Fahrleistung ermittelt werden kann. Die Methode beinhaltet das Erstellen von Fahrzeugtests. Im Rahmen von zwei Fallstudien, eine mit einem autonomen Fahrzeug auf dem Testfeld des GreenTec Campus in Enge-Sande und die andere mit einem autonomen Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr in Keitum auf Sylt, stellten wir unserer Methode folgend Fahrzeugtests und entsprechende Testergebnisse vor, um die Risikobilanz beider Fahrzeuge zu ermitteln. Für beide Fahrzeuge, in der vorliegenden Version und Konfiguration, ermittelten wir eine negative Risikobilanz.

Literatur

- [Al17] Alvarez, S.; Page, Y.; Sander, U.; Fahrenkrog, F.; Helmer, T.; Jung, O.; Hermite, T.; Düering, M.; Döering, S.; Op den Camp, O.: Prospective effectiveness assessment of ADAS and active safety systems via virtual simulation: a review of the current practices. In: 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration. 2017.
- [Bä17] Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T. G.; Köhler, K.: Fahrleistungserhebung 2014 - Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Fachverlag NW, Bremen, 2017, ISBN: 978-3-95606-337-4.
- [De16] (Destatis), S. B., Hrsg.: Fachserie 8 Reihe 7 (2016): *Verkehr 2014, Verkehrsunfälle*, URL: https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00018327/2080700147004_Korr15022016.pdf.
- [De17] (Destatis), S. B., Hrsg.: Qualitätsbericht (2017): *Statistik der Straßenverkehrsunfälle*, URL: https://www.destatis.de/DE/Methoden/Qualitaet/Qualitaetsberichte/Verkehrsunfaelle/strassenverkehrsunfaelle.pdf?__blob=publicationFile.
- [Et17] Ethik-Kommission: Automatisiertes und Vernetztes Fahren, Bericht, Berlin, DE: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Juni 2017.
- [EZ13] Eckstein, L.; Zlocki, A.: Safety potential of ADAS-combined methods for an effective evaluation. In: 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) Seoul, South Korea. S. 15–25, 2013.
- [Fe21] Feng, S.; Yan, X.; Sun, H.; Feng, Y.; Liu, H. X.: Intelligent driving intelligence test for autonomous vehicles with naturalistic and adversarial environment. *Nature communications* 12/1, S. 1–14, 2021.
- [GHF19] Gambi, A.; Huynh, T.; Fraser, G.: Generating effective test cases for self-driving cars from police reports. In (Dumas, M.; Pfahl, D.; Apel, S.; Russo, A., Hrsg.): *Proceedings of the ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering, ESEC/SIGSOFT FSE 2019, Tallinn, Estonia, August 26-30, 2019*. ACM, S. 257–267, 2019, URL: <https://doi.org/10.1145/3338906.3338942>.
- [Hu16] Huang, W.; Wang, K.; Lv, Y.; Zhu, F.: Autonomous vehicles testing methods review. In: 19th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2016, Rio de Janeiro, Brazil, November 1-4, 2016. IEEE, S. 163–168, 2016, URL: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795548>.
- [IS11] ISO 26262-3:2011(E): Road vehicles – Functional safety – Part 3: Concept Phase, Geneva, CH, Nov. 2011.

- [KP16] Kalra, N.; Paddock, S. M.: Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94/, S. 182–193, 2016, ISSN: 0965-8564, URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856416302129>.
- [On18] On-Road Automated Driving (ORAD) committee: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, Juni 2018.
- [PN21] Potdevin, Y.; Nowotka, D.: Methode zur Bewertung der Risikobilanz autonomer Fahrzeuge aus Kundensicht./, 2021, URL: https://macau.uni-kiel.de/receive/macau_mods_00001452.
- [Sc20] Schwall, M.; Daniel, T.; Victor, T.; Favaro, F.; Hohnhold, H.: Waymo Public Road Safety Performance Data. *CoRR* abs/2011.00038/, 2020, arXiv: 2011.00038, URL: <https://arxiv.org/abs/2011.00038>.
- [SMP19] Stöber, M.; Möller, A.; Pieronczyk, M.-C.: Haftungsrechtliche Probleme des autonomen Fahrens (3 Teile). *Verkehr und Technik*/5, 6 & 7, 2019.
- [Tu18] Tuncali, C. E.; Fainekos, G.; Ito, H.; Kapinski, J.: Simulation-based Adversarial Test Generation for Autonomous Vehicles with Machine Learning Components. In: *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV 2018*, Changshu, Suzhou, China, June 26-30, 2018. IEEE, S. 1555–1562, 2018, URL: <https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500421>.
- [Ve15] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): VDA-Empfehlung 702, 06.2015: Situationskatalog E-Parameter nach ISO 26262-3, Berlin, Juni 2015.