

Über das verantwortliche Fahren Autonomer Fahrzeuge

Hans-Peter Schöner*

Zusammenfassung: Dieser Beitrag diskutiert zunächst die wichtigsten Faktoren, die verantwortungsvolles Fahren begründen, und darauf aufbauend einige technische Vorkehrungen, die hilfreich sind, um den Nachweis verantwortungsvollen Verhaltens beim autonomen Fahren zu unterstützen. Es verknüpft die Argumente mit dem Konzept der Taktischen Sicherheit: In Verkehrssituationen frühzeitig und proaktiv handeln, um nicht-beherrschbare Situationen mit möglicherweise hoher Unfallschwere zu vermeiden. Eine wichtige Konsequenz ist eine durchgängige Sicherheitsmetrik, die es ermöglicht, Gefahr als 'Entfernung' von einem Schadens-Ereignis zu messen. Verlässliche Kommunikation unter Verkehrsteilnehmern ermöglicht frühzeitiges Erkennen von Bedingungen für mögliche Gefahren. Abschließend wird die Kombination dieser Aspekte zur Bewertung der Fahr-Verantwortung von autonomen Fahrzeugen diskutiert.

Schlüsselwörter: Fahr-Verantwortung, Sicherheitsmetrik, Taktische Sicherheit, Verlässliche Kommunikation.

1 Der verantwortliche Fahrer

Als 'verantwortliche Person' wird normalerweise die Person wahrgenommen, die für Fehlverhalten bestraft werden könnte, wenn in ihrem Verantwortungsbereich etwas schief geht. Aber vor der Bestrafung besteht für die Person die Möglichkeit, sich zu verteidigen, indem sie ihr verantwortungsvolles Verhalten einem Richter darlegt. Dazu gehört insbesondere auch die Beantwortung von folgenden Fragen des Richters: ‚Können Sie erklären, wie dieser Unfall überhaupt passieren konnte?‘; ‚Warum haben Sie diesen Unfall nicht viel früher kommen sehen?‘; ‚Mit welcher Intention und wie haben Sie gehandelt, und warum haben Sie nicht ausreichend schnell und stark genug reagiert, um den Unfall noch zu vermeiden?‘. Nur wenn der Verantwortliche auf diese Fragen überzeugend antworten kann, indem er dem Richter entweder sein dem Stand der Technik entsprechendes Verhalten oder die höhere Gewalt der Sachlage darlegt, wird er aus dem Verfahren ohne Schuldspruch oder gar Bestrafung für Fehlverhalten herauskommen.

* Dr. Hans-Peter Schöner ist CEO von ‚Insight from Outside‘-Consulting, www.ifo-consulting.com (e-mail: hans-peter.schoener@gmx.net).

Analysiert man den Fragenkatalog, lassen sich drei Hauptpunkte herauslesen:

- Der verantwortliche Fahrer muss *ein Verständnis für die Aufgabe und die Szenarien nachweisen*, in denen er für die Sicherheit verantwortlich ist: Was sind die Gründe für Gefährdungen (Gefahrenpotentiale), unter welchen Bedingungen und wie wahrscheinlich drohen Gefahren, welche Handlungen können Gefahren erhöhen, verringern oder zuverlässig abwenden.
- Der verantwortliche Fahrer muss die Entwicklung der Situation *kontinuierlich beobachten und dabei eine Bewertung der Sicherheit* durchführen, um mögliche Gefahren frühzeitig zu erkennen, so dass die weitere sichere Entwicklung der Situation noch gewährleistet werden kann. Er muss sein Wissen und Verständnis über verborgene Gefahren und Risiken einbeziehen und wahrscheinliche Entwicklungen der Situation antizipieren, insbesondere bei unvollständigen Informationen über das gesamte Szenario.
- Der verantwortliche Fahrer muss das erwartete Verhalten anderer und die eigenen Wahrnehmungs- und Reaktionsfähigkeiten einbeziehen, um die *Wirksamkeit seiner möglichen Reaktionen zu beurteilen*. Wetter-, Straßen- und Verkehrsverhältnisse müssen berücksichtigt werden, um schnell und stark genug reagieren zu können.

In einem Gerichtsverfahren spielen auch Zeugen eine Rolle; sie tragen zur Klärung durch beobachtbare Fakten bei: *Was ist passiert? Wie waren die Bedingungen? In welcher Abfolge geschah etwas?* Im Gegensatz zu einem Zeugen muss die verantwortliche Person jedoch zusätzliche Fragen beantworten, um das *Warum* zu erklären: Was waren Ihre *Absichten*? Welche *Schlüsse* haben Sie aus den beobachtbaren Fakten gezogen? Und nach welchen *Überlegungen* haben Sie *Ihr Verhalten* und *Ihre Reaktionen* ausgerichtet?

Andererseits hat die Verantwortung für eine Aufgabe oder einen Prozess nicht nur das Ziel, einen unbeschadeten Ausgang eines Rechtsstreits sicherzustellen. Das Hauptziel der Verantwortung besteht darin, die Aufgabe oder den Prozess zum Erfolg zu führen, *einschließlich* der Sicherstellung, dass aus dieser Aktivität keine unangemessenen Gefahren entstehen. Die Berücksichtigung der o.g. erwarteten Fragen eines Richters ist jedoch eine gute Grundlage, um sich bewusst zu machen, wie verantwortungsvolles Verhalten umgesetzt werden kann.

Alle diese Anforderungen an einen verantwortungsvollen Fahrer gelten nicht nur für menschliche Fahrer, sondern müssen auch bei technischen Umsetzungen eines verantwortungsbewussten Fahrers berücksichtigt werden. Die Fragen, die in einem Gerichtsverfahren gestellt werden, sind genau die gleichen, die ein Entwickler bei der Entwicklung des verantwortungsvollen Verhaltens einer technischen Lösung berücksichtigen muss. Nur durch solch verantwortungsvolles Verhalten lassen sich viele seltene, aber schwere Unfälle vermeiden – im langfristigen und umfassenden Einsatz werden auch seltene gefährliche Situationen mit immer höherer Wahrscheinlichkeit auftreten.

2 Das Konzept der ‘Taktischen Sicherheit’

Auftretenswahrscheinlichkeit, *Beherrschbarkeit* und *Schadenshöhe* von Unfallsituationen sind als die drei elementar beitragenden (multiplikativen) Faktoren für ein quantifiziertes Risikomanagement in vielen Anwendungen bekannt, wie ausführlicher in [3] und [4] erläutert. Wenn die Beherrschbarkeit als Wahrscheinlichkeit C gemessen wird, eine herausfordernde Situation schadlos zu meistern, dann ist der anwendbare Faktor zur Berechnung des Risikos (1-C). Der Risikobeitrag R eines einzelnen risikobeitragenden Szenarios ist also

$$R = E (1-C) S$$

mit

- E: Auftretenswahrscheinlichkeit (exposure) einer unfallträchtigen Situation (durch äußere Bedingungen oder eigenes Verhalten);
- C: Beherrschbarkeit (controllability) als Wahrscheinlichkeit für die Vermeidbarkeit von Schäden in einer akuten unfallträchtigen Situation;
- S: Schadenshöhe bzw. Schwere (severity) eines Unfalls, wenn ein Schaden nicht vermieden werden konnte.

Um das Gesamtrisiko gering zu halten, muss der verantwortliche Fahrer die Wahrscheinlichkeit einer gefährlichen Situation (E) einschätzen, und zwar insbesondere solche mit einem hohen möglichen Schweregrad S oder solchen mit einer geringen Beherrschbarkeit C. Ein guter menschlicher Fahrer wird immer bestrebt sein, die Exposition E gegenüber solchen Situationen durch aktive Änderung seines Verhaltens zu verringern: Da ein hoher Geschwindigkeitsunterschied der Hauptparameter ist, der zur Schwere beiträgt, verringert eine *Geschwindigkeitsreduzierung* im Allgemeinen die mögliche Schadenshöhe; und da die verfügbare Reaktionszeit (des Fahrers selbst, aber auch anderer Verkehrsteilnehmer) der Hauptbeitragsparameter zur Beherrschbarkeit ist, verringert ein *größerer räumlicher und damit auch zeitlicher Abstand* zu anderen Objekten das Risiko, eine Gefahrensituation nicht beherrschen zu können.

Daraus leitet sich das Konzept der *Taktischen Sicherheit* ab: Eine frühzeitige und sanfte Änderung des Verhaltens auf Basis von Indikatoren für möglicherweise gefährliche Situationen, um potentiell unkontrollierbare Situationen zu verhindern.

Solche taktischen Verhaltensänderungen bringen die Verkehrsteilnehmer in eine sicherere Position gegenüber potenziell unkontrollierbaren, schweren Unfallsituationen. Auf diese Weise vermeiden sie, im Falle einer aufkommenden Gefahr gezwungen zu sein, in einer herausfordernden kurzen Zeitspanne oder mit ungewöhnlich hoher Intensität auf eine plötzlich auftretende Situation zu reagieren. Solche frühzeitigen und sanften Änderungen des Verhaltens als Maßnahme der ‘taktischen Sicherheit’ reduzieren das *Risiko* im Straßenverkehr. Sie ergänzen die Begrenzung der *Schadenshöhe* in Kollisionen durch Maßnahmen der ‘Passiven Sicherheit’ sowie die Beherrschbarkeit von akuten *Gefahren* durch schnelle und heftige Eingriffe der ‘Aktiven Sicherheit’ in kritischen Situationen.

Die Notwendigkeit taktischer Verhaltensänderungen spiegelt die Tatsache wider, dass allgemeine Verkehrsregeln den Verkehr unter *normalen* Bedingungen sicher machen sollen, aber nicht ohne Änderungen auf *alle auftretenden* Verkehrssituationen angewendet werden können. Beispielsweise ist die Reaktionszeit eine Kombination aus *Wahrnehmungszeit* und *Aktionszeit*: Beide können stark von Verkehrs- und Wetterbedingungen abhängen, aber auch vom Zustand der Straße oder des eigenen Fahrzeugs. Ungewöhnliche Bedingungen erfordern ein außergewöhnlich vorsichtiges Verhalten. Auch kooperatives Verhalten zur gemeinsamen Bewältigung von Situationen, in denen die einfache Anwendung allgemeiner Regeln zu einer Verkehrsbehinderung oder -gefährdung führen würde, sind Ausdruck taktischen Sicherheitsverhaltens.

3 Die Bedeutung einer kontinuierlichen Sicherheits-Metrik

Für die taktische Sicherheit reicht es also nicht aus, allgemeine Verhaltensregeln strikt zu befolgen, sondern es muss für jedes einzelne Szenario separat *beurteilt* werden, ob die allgemeinen Regeln noch angemessen oder möglicherweise nicht sicher genug sind. Ein wesentlicher Bestandteil für die technische Umsetzung dieser Aufgabe ist eine geeignete Metrik für die Gefährlichkeit (oder Sicherheit) einer Situation. In Abb. 1 [3] wird (am Beispiel des sicheren zeitlichen Folgeabstands bei Autobahnfahrten) gezeigt, dass eine kontinuierliche Sicherheitsmetrik diesem Ziel viel besser dienen kann als eine traditionelle scharfe (binäre) Unterscheidung zwischen sicheren und unsicheren Situationen.

Im linken Teil der Abb. 1 ist das traditionelle binäre Konzept der Sicherheitseinstufung skizziert: Eine bestimmte Situation gilt als sicher, wenn ein relevanter Parameter, wie der zeitliche Sicherheitsabstand für die Autobahnfolgeaufgabe, über einem definierten Grenzwert liegt, und als unsicher unterhalb desselben Grenzwerts. Diese scharfe Grenze ist nützlich für die Entscheidung, ob eine Notfallmaßnahme eingeleitet werden muss, um eine Kollision in der letztmöglichen Sekunde zu vermeiden. Der geeignete Schwellwert hierfür hängt jedoch von der konkreten Situation ab: In normalen Fahrsituationen (1) würde ein geringer Sicherheitsabstand ausreichen, in seltenen Fällen (2, wie z. B. bei einer nassen Fahrbahn) wird jedoch ein deutlich höherer Sicherheitsabstand benötigt. Und bei extremen Bedingungen (3, wie bei schlechter Sicht, Glatteis oder überschwemmter Fahrbahn) ist ein noch größerer Sicherheitsabstand nötig, um eine Kollision zuverlässig zu vermeiden – selbst bei sonst gleichartiger Verkehrskonstellation (wie plötzliches Abbremsen eines vorausfahrenden Fahrzeugs). Jede konkrete Wahl einer einzelnen Worst-Case-Situation und des entsprechenden Schwellwerts für die Auslegung führt zu einer Bewertung, die entweder zu restriktiv für normale Situationen oder zu fahrlässig für seltene und extreme Situationen ist. Eine taktische Anpassung an veränderte Bedingungen ist eine Lösung. Aber die binäre Sicherheitsmetrik ist dafür nicht hilfreich.

Die rechte Seite von Abb. 1 zeigt den Fall einer kontinuierlichen Sicherheitsmetrik. Dabei reicht die Skala für die Sicherheitsbewertung von *‘verlässlich sicher’* (für große relevante

Abbildung 1: Übergang von binärer zu kontinuierlicher Metrik für sicheres Fahren
(z.B. zeitlicher Sicherheitsabstand als relevanter Sicherheitsparameter)

Im Haupttext von [5] wird eine kontinuierliche Sicherheitsmetrik vorgeschlagen, parametrisiert aus Beobachtungen des menschlichen Verhaltens während des Fahrens auf Autobahnen; ein ausreichender Sicherheitsabstand ist breit gestreut und wird je nach Gegebenheiten und individuellem Ermessen gewählt. In [1] wird die kontinuierliche Sicherheitsmetrik unter Verwendung des binären RSS-Sicherheitsmodells [2] abgeleitet, wobei jedoch berücksichtigt wird, dass dieses Modell unterschiedlich parametrisiert werden muss, je nachdem, welches maximale Bremskraftniveau als akzeptabel angesehen wird. Beide Ansätze kommen zu sehr ähnlichen Ergebnissen, obwohl ihr ursprünglicher Ansatz recht unterschiedlich ist: Beide ordnen eine kontinuierliche Sicherheitsfunktion dem Verkehrsszenario selbst zu, während die äußeren Bedingungen von Wetter, Straße, Fahrzeug und Beobachtbarkeit der Situation bestimmen, welches Niveau der Sicherheitsmetrik zu einer akzeptablen Sicherheit für die spezifische Situation führt.

Basierend auf einer solchen Metrik kann das resultierende Sicherheitsniveau eines beobachteten Verhaltens in einem bestimmten Szenario gemessen und als *Qualitätsindex* für das Verhalten des Fahrers verwendet werden. Die kontinuierliche Sicherheitsmetrik ermöglicht es zudem, eine *Regelgröße* für das Fahrverhalten des autonomen Fahrzeugs festzulegen: Es kann eine Sicherheitsreserve abhängig von den äußeren Bedingungen adaptiv zugewiesen werden und so das Fahrzeug mit einer angemessenen Reserve für Unvorhergesehenes gegenüber den Grenzen der Unbeherrschbarkeit fahren. Darüber hinaus benötigt künstliche Intelligenz zum Lernen einen Bewertungsindex, und die kontinuierliche Sicherheitsmetrik kann (nach Abschluss des Szenarios) als *retrospektiver Indikator* für das automatische Lernen von verbessertem Verhalten dienen.

Für das Testen und die Freigabe von autonomen Fahrzeugen kann die Anwendung kontinuierlicher Sicherheitsmetriken (ggf. für mehrere relevante Parameter) als Nachweis dafür dienen, dass ein autonomes Fahrzeug das Gefahrenniveau eines Szenarios 'verstehen' und sich an die äußeren Bedingungen anpassen kann. Das Konzept hat ein hohes Potenzial, kann aber durch weitere Forschung und Entwicklung noch ausgebaut werden, um sich als wesentlicher Bestandteil für die Sicherheitsbewertung autonomer Fahrzeuge zu etablieren.

4 Die Rolle von kooperativem Sensieren für die Sicherheit autonomer Fahrzeuge

Eine zweite wesentliche Komponente für die taktische Sicherheit ist die Fähigkeit, nach vorne zu schauen und Anhaltspunkte für die Vorhersage der weiteren Entwicklung eines Szenarios zu haben. Aufgrund der Tatsache, dass der vorausfahrende Verkehr die Sicht jeglicher bordeigener Sensorik beeinträchtigen kann, gibt es Risiko-Szenarien mit großer

Schadenshöhe, die insbesondere bei schneller Autobahnfahrt nicht vollständig vom Fahrzeug selbst aus im Sinne der Regelungstechnik 'beobachtbar' sind [3]. Eine solche unvollständige Beobachtbarkeit erfordert eine Verhaltensänderung zur sicheren Seite, da sie unter ungünstigen Bedingungen die Gefahr einer schweren Kollision impliziert. In solchen Szenarien können menschliche Fahrer schwache Hinweise erkennen (oft als 'Intuition' oder 'Siebter Sinn' bezeichnet) oder Warnhinweise anderer Verkehrsteilnehmer verstehen und als Anlass für taktisches Sicherheitsverhalten anwenden. Eine gleichwertige Technologie für autonome Fahrzeuge fehlt noch. Angesichts der heute gut funktionierenden Dienste, die auf Crowdsourcing-Informationen basieren, kann eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen über Verkehrs-, Straßen- und Wetterbedingungen – unter einigen zusätzlichen Voraussetzungen – diese Lücke schließen.

Eine mögliche Lösung ist die Einrichtung einer 'Echtzeit-Verkehrssicherheits-Datenbank' ('Real-time Traffic Safety Data Base', RTS-DB) mit vertrauenswürdigen und zeitgestempelten Informationen über den tatsächlichen Verkehr, das Wetter und die Straßenbedingungen, wie sie z.B. in der EU schon seit einiger Zeit vorgesehen, aber bisher nur in Forschungsprojekten umgesetzt wurde [6], [7]. Diese Datenbank sollte Verkehrswarnungen entsprechen, wie sie über Radio oder Verkehrsfunk an menschliche Fahrer verteilt werden. Aber es sollte präziser, vertrauenswürdiger und mit Informationen über *Vollständigkeit* und *Aktualität* der Informationen ausgeführt sein. Nur auf diese Weise können diese Warnungen als *verlässliche* Informationen für Sicherheitsanwendungen verwendet werden. Um verlässlich und vollständig zu sein, benötigt die Datenbank nicht nur Informationen über Orte erhöhter Gefahren, sondern ergänzend auch bestätigende Informationen über normal fließenden Verkehr ohne ungewöhnliche Gefahren. Auf diese Weise werden auch Orte mit *fehlenden* ausreichenden, verlässlichen oder aktuellen Informationen über die Verkehrslage offensichtlich. Die Datenbank muss von autonomen Fahrzeugen lesbar sein und als zusätzlicher Input für die taktische Verhaltensentscheidung eines automatischen Fahrsystems dienen. Zusätzlich wäre sie auch für ADAS-Systeme der *Taktischen Sicherheit* zur Unterstützung menschlicher Fahrer verwendbar.

In [3] und [4] wird ein mögliches Einstiegskonzept für eine RTS-DB vorgeschlagen, das die Fahrgeschwindigkeit für jeden Fahrstreifen auf Schnellstraßen erfasst und bereitstellt, siehe Abb. 2. Kernpunkt dieses Konzepts ist die Behandlung hoher Geschwindigkeitsunterschiede auf einer Schnellstraße als ein Sicherheitsrisiko; sie können zu schweren Kollisionen führen, insbesondere wenn sie unerwartet und zudem hinter vorausfahrendem Verkehr verborgen sind. Crowdsourcing-Geschwindigkeitsprofile entlang Autobahnen erfüllen die Vollständigkeits- und Aktualitätsanforderungen mit relativ geringen Bandbreiten- und Realitäts-zu-Datenbank-Latenzanforderungen.

Das Konzept nach Abb. 2 sammelt Geschwindigkeitsinformationen von jedem beitragenden Fahrzeug auf der Straße. Das Fahrzeug meldet mindestens seine eigene Geschwindigkeit, Fahrstreifen und Längsposition; mit einem Radarsensor können entsprechende Informationen auch über andere Objekte auf der Straße (einschließlich nicht

mit Sensoren bestückter Fahrzeuge und Hindernisse) erfasst und geliefert werden. Insbesondere, wenn sowohl langsam fahrende Lkw als auch eher schnell fahrende Luxus-Pkws diese Datenerhebung unterstützen, kann schon mit einer relativ geringen Teilnehmerzahl ein vollständiges Bild über den Verkehrsfluss erstellt werden. Zusätzliche Quellen dieser Informationen können straßenseitige Sensoren sein. Die Daten können für Längsabschnitte der Straße aggregiert und in Geschwindigkeitsklassen in Schritten von z.B. 30 km/h klassifiziert werden. Wichtig ist dabei die Information zur Aktualität und Datendichte in Zeit und Raum, beispielsweise durch Bereitstellung der Anzahl der Geschwindigkeitsmeldungen pro Abschnitt in einem gleitenden letzten Zeitintervall.

Diese Daten werden zu verlässlichen Informationen, wenn unterstützende Metadaten von einem Dienstleister zusätzlich bereitgestellt werden können, insbesondere wie viele *konsistente* Datenberichte pro Straßenabschnitt und in einem definierten aktuellen Zeitintervall verfügbar sind [4]. Der Information *‘auf Spur i fließt der Straßenverkehr mit der angezeigten Geschwindigkeit’* ist ab einer gewissen Anzahl konsistenter Meldungen in den letzten Minuten (z. B. die letzten 3 Minuten) zu trauen. Aber auch das Wissen, dass es keine oder nur sehr wenige Datenpunkte gibt, ist eine auswertbare Information, die in Verbindung mit der Kenntnis des aktuell vorliegenden Erfassungshorizonts des eigenen Fahrzeugs genutzt werden kann, um daraus auf ein sicheres oder möglicherweise gefährliches eigenes Fahrverhalten zu schließen. Die Kommunikation der Datenbank bietet so eine redundante, diversitäre und weitreichende Quelle für die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Verkehrs.

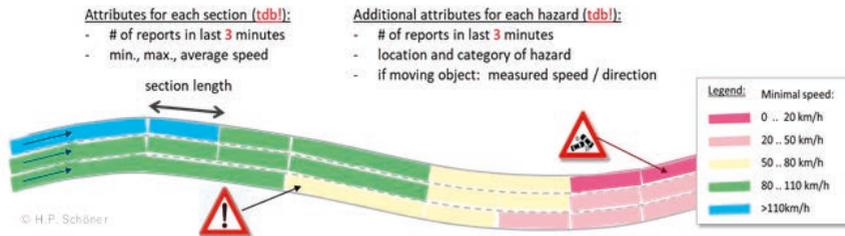


Abbildung 2: Konzept für eine vollständige und verlässliche Gefahrenwarnung auf Schnellstraßen [3]

Aus Sicht des Autors sollte eine solche Echtzeit-Sicherheits-Datenbank zumindest für autonome Fahrzeuge mit hohen Fahrgeschwindigkeiten obligatorisch sein, solange ein fahrzeugbasiertes Sensorset alleine nicht garantieren kann, das vollständige Bild der vorausliegenden Straße zu liefern. Die genaue Spezifikation der Dateninhalte ist noch offen für die technologische Entwicklung auf der Basis bestehender Grundlagen [6, 7].

Eine Crowdsourcing-Datensammlung kann offen gestaltet sein und die Funktionalität bezogen auf spezielle Gefährdungen oder Services im Laufe der Zeit erhöht werden. Ein großer Schritt für die Sicherheit ist aber alleine der Übergang von ‘*vagen Informationen über vereinzelt Verkehrereignisse*’ auf ein ‘*vollständiges, aktuelles und verlässliches Wissen über den Verkehrsfluss*’ auf der vorausliegenden Strecke.

5 Bewertung des verantwortlichen Fahrens Autonomer Fahrzeuge

Sowohl die ‘Kontinuierliche Sicherheits-Metrik’ als auch die ‘Real-time Traffic Safety Data Base’ können das Risikomanagement für *automatisierte* oder *autonome* Fahrzeuge nachhaltig verbessern. Darüber hinaus können sie auch dazu beitragen, die Sicherheit von Fahrzeugen mit *menschlichen* Fahrern zu verbessern. Beide benötigen keine fahrerlosen Fahrzeuge auf der Straße, um das Konzept umzusetzen; sie können ebenso gut in von Menschen geführten Fahrzeugen eingeführt werden. Für einen zügigen Aufbau dieser Sicherheitskonzepte im Zusammenhang mit der Einführung autonomer Fahrzeuge könnte jedoch eine Verordnung hilfreich sein, da ein einzelner Hersteller kaum in der Lage ist, den erforderlichen Standard ohne eine solche Verordnung zu setzen.

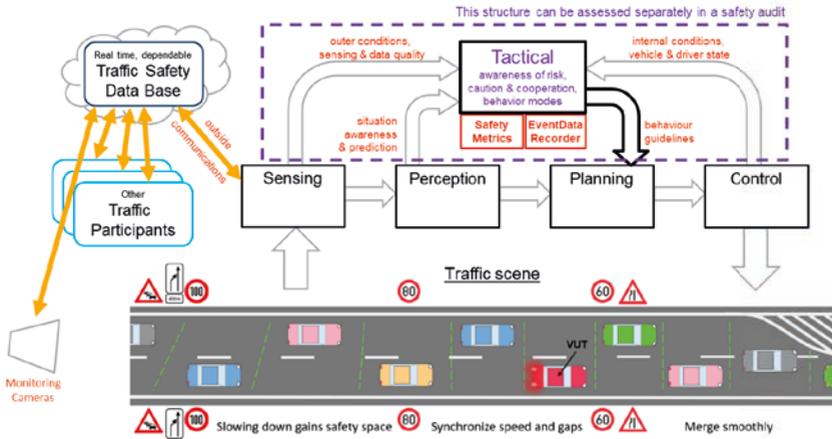


Abbildung 3: Beurteilung sicherheitsrelevanten Verhaltens von Autonomen Fahrzeugen

Ein generisches Blockdiagramm, wie Sicherheitsmetriken und kooperatives Sensieren zur Implementierung von Taktischer Sicherheit in einem Autonomem Fahrsystem (Autonomous Driving System, ADS) beitragen können, ist in Abb. 3 [3] dargestellt; die

Struktur innerhalb des gestrichelten Rechtecks könnte als *‘Taktisches Verhaltensmodul’* bezeichnet werden. Die Aufgabe dieses Moduls besteht darin, das Zusammenwirken des gesamten ADS in Bezug auf die impliziten Verantwortlichkeiten eines Fahrers explizit darzustellen. Es berücksichtigt Informationen aus den verschiedenen Hauptbausteinen eines autonomen Fahrsystems (Umfelderfassung, Situationsbewertung, Fahrplanung, Steuerung), zum Beispiel:

- Bewertung der Integrität des Gesamtsystems (abgeleitet aus der Überprüfung des Zustands der Fahrzeugsysteme, insbesondere der Erfassungs- und Steuerungsfähigkeiten),
- Beurteilung der herrschenden Umgebungsbedingungen (abgeleitet aus Wahrnehmung und Vorhersage der Verkehrssituation aus eigener Sensorik sowie aus der Außenkommunikation),
- Gesamtrisikobewertung (abgeleitet aus der Szenarioerkennung, äußeren Bedingungen und den Sicherheitsmetriken).

Aus all diesen Eingaben generiert das taktische Verhaltensmodul eine Risikobewertung für das autonome Fahrsystem, leitet das notwendige Maß an Vorsicht und Kooperation ab und stellt die Parameter für die Steuerung entsprechend ein. In besonderen Fällen schaltet es zwischen verschiedenen grundsätzlichen Verhaltensmodi der Steuerung um. Zusammenfassend führt das taktische Verhaltensmodul eine Einschätzung der Sicherheit der Situation durch und steuert Verhaltensrichtlinien zur Risikominderung.

Der ‘Event Data Recorder’ (EDR), wie er bereits von mehreren Verordnungen gefordert wird, wäre ein Bestandteil dieses taktischen Verhaltensmoduls, der die notwendigen Daten bereitstellt und speichert, die für taktische Sicherheitsentscheidungen benötigt und verwendet werden; im Falle eines Gerichtsverfahrens kann der EDR als *Zeuge* für den untersuchten Sachverhalt dienen. Der Block ‘Safety Metrics’ berechnet aus diesen Daten die quantitative Einschätzung von Sicherheits- bzw. Gefährdungslage, und damit die verantwortungsgemäße *Begründung* für taktische Verhaltensentscheidungen. Diese helfen bei Freigabe- und Zulassungsprüfungen (und ggf. bei Gerichtsverfahren) zu beurteilen, ob die Situation bezüglich Gefährdungen ausreichend analysiert und ‘verstanden’ wurde, und ob die Verhaltens-Entscheidungen des Systems angemessen waren. Die Sicherheitsmetriken und das taktische Sicherheitsmodul liefern also den entscheidenden Nachweis, ob bzw. dass die *Verantwortung* für die Fahraufgabe ausreichend wahrgenommen wurde.

Zusammenfassung

Für die verantwortungsvolle Fahraufgabe ist der Begriff des *Risiko-Bewusstseins* essentiell. Die Verwendung einer kontinuierlichen Sicherheitsmetrik bietet einen Mechanismus, um diesen Begriff in Fahrzeugsteueralgorithmen zu handhaben. Diese bietet eine Abstraktionsebene auf Basis der *Gefährlichkeit von Situationen*, die die Chance hat, die Komplexität der Sicherheitsbewertung autonomer Fahrzeuge zu vereinfachen. Sie erlaubt zudem zu beobachten, ob die Fahrzeugssteuerung die Fähigkeit hat, die Gefahren einer Situation einzuschätzen, und dann zu verifizieren, dass sie angemessen dazu handelt.

Die kooperative Erfassung und Nutzung von Verkehrsdaten in einer 'Echtzeit-Verkehrssicherheits-Datenbank' ist der zweite wichtige Faktor, um noch bestehende Handicaps bei der Wahrnehmung von Verkehrs-, Straßen- und Umwelt-Risikobedingungen zu überwinden. So können überragende menschliche Fähigkeiten zur Beurteilung der Gesamtsituation anhand zahlreicher unscharfer Hintergrundinformationen (wie Wettervorhersagen, Straßenzustandsinformationen, Warnlichter, etc.) durch proaktive Sicherheitsmaßnahmen autonomer Fahrzeuge unter Einbeziehung der Informationen der Echtzeit-Datenbank kompensiert werden.

Diese zusätzlichen Hinweise auf das Risiko einer Situation sind unerlässlich für *taktische Verhaltensentscheidungen* mit dem Endziel eines verantwortungsvollen Fahrens: *Halten wir uns bewusst von Gefahren fern, die wir möglicherweise nicht kontrollieren können!*

Literatur

- [1] Mattas, Konstantinos; e.al.; 2020. "Fuzzy Surrogate Safety Metrics for real-time assessment of rearend collision risk". In: Accident Analysis and Prevention 148 (2020)
- [2] MobilEye. 2018. "Implementing the RSS Model on NHTSA Pre-Crash Scenarios". https://www.mobileye.com/responsibility-sensitive-safety/rss_on_nhtsa.pdf
- [3] Schöner H.P., Antona-Makoshi J.: "Testing for Tactical Safety of Autonomous Vehicles". 30th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, 2021.
- [4] Schöner, Hans-Peter; Antona-Makoshi, Jacobo; 2022. "Tactical Safety for Autonomous Vehicles on Highways". in Winner, Hermann (editor) e.al.: Handbook Assisted and Automated Driving. 4th edition, Springer Nature, to be published 2022.
- [5] Schöner, Hans-Peter; Pretto, Paolo; Sodnik, Jaka; Kaluza, Bostjan; Komavec, Mojca; Varesanovic, Damir; Chouchane, Hanna; Antona-Makoshi, Jacobo; 2021. "A safety score for the assessment of driving style". Traffic Injury Prevention, 22:5, 384-389, DOI: 10.1080/15389588.2021.1904508
- [6] SensorIS; 2020. SensorIS_specification_v1.1.1. <http://www.sensoris.org/presentations>
- [7] SRTI Ecosystem; 2021. <https://www.dataforroadsafety.eu/>
- [8] Zadeh, Lotfi A. 2008. Fuzzy logic. Scholarpedia. 3(3):1766. doi: 10.4249/scholarpedia.1766

