

Der Fahrer im Mittelpunkt – Eye-Tracking als Schlüssel zum mitdenkenden Fahrzeug?

Martin Liebner*, Felix Klanner* und Christoph Stiller†

Zusammenfassung:

Durch die sich ständig weiterentwickelnde Umfelderkennung lassen sich immer mehr Gefahrensituationen im Straßenverkehr rechtzeitig vorhersagen. Gleichzeitig steigt jedoch auch der Anteil potenzieller Konflikte, die sich im weiteren Verlauf der Verkehrssituation als unkritisch erweisen. Um den Fahrer nicht mit einer Vielzahl von Warnungen kognitiv zu überlasten, wird eine Assistenz in Form eines elektronischen Copiloten vorgeschlagen, der auf Basis von Annahmen über das Situationsbewusstsein des Fahrers über die Notwendigkeit einer Warnung entscheidet. Die Grundzüge des Konzepts werden am Beispiel eines Fahrstreifenwechselassistenten diskutiert und anschließend auf die Situationsinterpretation im Kreuzungsbereich übertragen. Grundlage der Diskussion sind Untersuchungen hinsichtlich des Blickverhaltens von Fahrern im Realverkehr.

Schlüsselwörter: Fahrerbeobachtung, Intentionserkennung, Situationsbewusstsein

1 Der elektronische Copilot

Aktive Sicherheitssysteme wie ABS und DSC haben in den letzten 20 Jahren einen wesentlichen Beitrag geleistet, um den Anteil der Fahrunfälle auf deutschen Straßen signifikant zu senken. Darüber hinaus helfen fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme wie die Auffahrwarnung mit Anbremsfunktion, die Spurwechselwarnung und die Spurverlassenswarnung, Konflikte und somit Unfälle zwischen den Verkehrsteilnehmern zu vermeiden. In [1] wird argumentiert, dass derartige Verkehrsunfälle vor allem dann entstehen, wenn der Fahrer sich der aktuellen Verkehrssituation nicht in vollem Umfang bewusst ist. Das Ziel informierender und warnender Assistenzsysteme ist es daher, Informationsdefizite seitens des Fahrers zu beheben.

Durch die ständige Weiterentwicklung der Fahrumfelderfassung und die wachsende Zahl verfügbarer Assistenzsysteme besteht dabei grundsätzlich die Gefahr, den Fahrer mit zuviel Information zu überlasten. Darüber hinaus wird die Auslösung von warnenden Assistenzsystemen in Situationen, in denen kein Informationsdefizit vorliegt, als Störung des Fahrkomforts und Beschränkung der Souveränität des Fahrers empfunden. Dies gilt analog zu Beobachtungen bei menschlichen Beifahrern: Während ständige Hinweise und Warnungen als nervig empfunden werden und im schlimmsten Fall durch Ablenkung des

*Martin Liebner ist Doktorand und Felix Klanner Projektleiter bei der BMW Forschung und Technik GmbH, Hanauer Str. 46, 80992 München (e-mail: {martin.liebner, felix.klanner}@bmw.de).

†Christoph Stiller ist Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe (e-mail: stiller@kit.edu).

Fahrers sogar Gefahrensituationen herbeiführen können, beobachtet ein guter Beifahrer sowohl das Verkehrsgeschehen als auch den Fahrer und gibt Hinweise nur dann, wenn er das Gefühl hat, dass der Fahrer einen wesentlichen Aspekt der aktuellen Verkehrssituation nicht wahrgenommen hat, und dass sich durch dieses Informationsdefizit eine Gefährdungssituation ergibt.

Ein wesentliches Kriterium bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ist die Transparenz ihrer Funktionalität. Bei heutigen Systemen bedeutet dies, dass der Fahrer grundsätzlich in jeder Situation vorhersagen kann, ob er gewarnt werden wird oder nicht. Soll nach dem Vorbild des menschlichen Beifahrers auch die Schätzung des Situationsbewusstseins des Fahrers in diese Entscheidung mit einfließen, so wird dieser insbesondere dann gewarnt, wenn er nicht damit rechnet, und nicht gewarnt, wenn er dies (in Kenntnis der Situation) erwartet. In dieser Hinsicht ist also ein Umdenken erforderlich, dahingehend, dass das Assistenzsystem nicht mehr als transparentes technisches System, sondern als mitdenkender elektronischer Copilot zu verstehen ist.

Vor dem Hintergrund der Einführung von Car2X-Kommunikation ist ein solches Umdenken ohnehin erforderlich. Die Kommunikation ermöglicht eine Erhöhung der Sensorreichweite, eine verbesserte Detektion verletzlicher Verkehrsteilnehmer, die Auflösung von Verdeckungen und sogar das Anbieten von aktiven Sicherheitssystemen für Fahrzeuge ohne eigene Umfelderkennung. Dies funktioniert jedoch immer nur dann, wenn die betreffenden Verkehrsteilnehmer oder die Infrastruktur mit diesem System ausgestattet sind. Bezogen auf den elektronischen Copiloten bedeutet dies, dass dieser zwar in bestimmten Fällen den entscheidenden Hinweis zur Unfallvermeidung geben wird, die Verfügbarkeit der Assistenz analog zu der des menschlichen Beifahrers jedoch nicht garantiert werden kann.

Im folgenden Abschnitt wird die Grundidee des elektronischen Copiloten am Beispiel einer Fahrstreifenwechsel-Assistenz auf der Autobahn erläutert. In Abschnitt 3 wird das Konzept daraufhin auf die Situationsinterpretation im Kreuzungsbereich übertragen. Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse in Abschnitt 4 noch einmal zusammengefasst.

2 Fahrstreifenwechsel auf der Autobahn

Unzureichend abgesicherte Fahrstreifenwechsel stellen die häufigste Unfallursache auf deutschen Autobahnen dar [2]. Insbesondere das Einschätzen der Geschwindigkeitsdifferenz zu von hinten herannahenden Fahrzeugen bereitet vielen Fahrern Schwierigkeiten. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass der rückwärtige Verkehr in Situationen mit partieller Sichtverdeckung, wie in Abb. 1 dargestellt, trotz Spiegelblick übersehen wird. In beiden Fällen kann es hierbei zu kritischen Auffahrsituationen kommen.

2.1 Fahrerabsichtserkennung

Mit der Spurwechselwarnung existiert bereits ein System im Serienfahrzeug, das den Fahrer bei der Durchführung von Fahrstreifenwechseln unterstützt. Von hinten herannahende Fahrzeuge werden typischerweise durch eine Warnleuchte im jeweiligen Außenspiegel angezeigt. Setzt der Fahrer dennoch den Blinker, wird die Warnung z.B. durch Vibrieren des Lenkrads intensiviert.

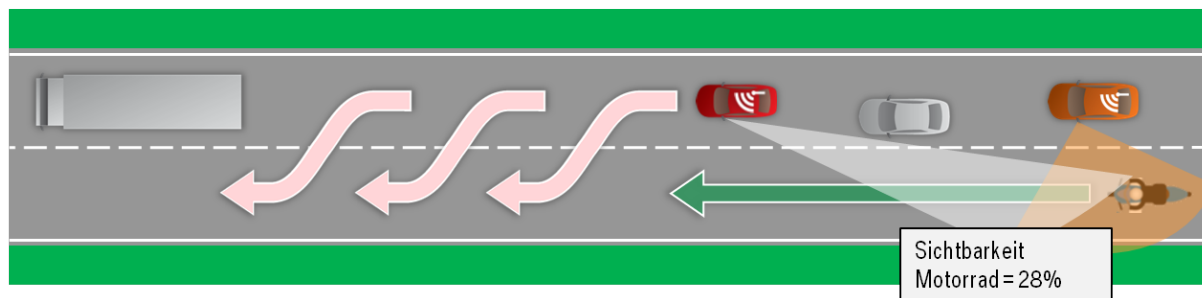


Abbildung 1: Fahrstreifenwechsel-Szenario auf der Autobahn.

Eine Studie des Auto Club Europa hat allerdings ergeben, dass etwa 30% der Fahrstreifenwechsel auf deutschen Autobahnen ohne Setzen des Blinkers erfolgt [3]. Um diese dennoch vorhersagen zu können, wurde in den letzten Jahren verstärkt die Eignung von Blickrichtung und Kopfdrehung des Fahrers als frühzeitiger Indikator für bevorstehende Fahrstreifenwechsel untersucht [4, 5].

Abbildung 3 zeigt die zeitliche Verteilung der Blicke in den linken Außenspiegel als Ergebnis entsprechender Untersuchungen bei BMW [6]. Grundlage hierfür waren 650 Fahrstreifenwechsel nach links, durchgeführt von 5 Probanden. Deutlich erkennbar ist eine Häufung der Spiegelblicke ca. 2–5 s vor dem Fahrstreifenwechsel, der wie in [4] zum Zeitpunkt des Überfahrens der Fahrstreifenmarkierung definiert ist.

Die zeitlichen Vorhersagepotentiale der im Rahmen der Studie untersuchten Merkmale sind in Abb. 4 zusammengefasst. In Übereinstimmung mit den bestehenden Arbeiten konnte gezeigt werden, dass das Blickverhalten insbesondere für den für Fahrerassistenzsysteme wichtigen Vorhersagehorizont von 2–3 s einen wichtigen Indikator für die Spurwechselabsicht des Fahrers darstellt. Darüber hinaus erhöht auch die Annäherung an ein langsamer fahrendes Vorderfahrzeug die Wahrscheinlichkeit eines bevorstehenden Fahrstreifenwechsels.

In [4], einer der aktuellsten Veröffentlichungen auf dem Gebiet, erfolgt die Vorhersage von Fahrstreifenwechseln mit Hilfe einer Relevance Vector Machine (RVM), wobei zusätzlich zu den in Abb. 4 angeführten Merkmalen auch die Gegenwart und die Relativgeschwindigkeit von hinten herannahender Folgefahrzeuge als Eingangsgrößen verwendet werden. Geht man davon aus, dass für das Training des Klassifikators keine wirklich kritischen Situationen herbeigeführt wurden, bedeutet dies, dass die prädizierte Fahrstreifenwechselwahrscheinlichkeit in Gegenwart deutlich schnellerer Folgefahrzeuge stets nahe Null liegen wird. Für die Situationsinterpretation von Fahrerassistenzsystemen ist dieser Ansatz nicht zu verwenden, da die (wenn auch geringe) Wahrscheinlichkeit eines Fehlverhaltens des Fahrers ja gerade den Sinn eines solchen Systems ausmacht.

Der Mangel an Daten von Unfällen und Beinahe-Unfällen ist ein prinzipielles Problem bei der Entwicklung von Algorithmen zur Risikobewertung von Verkehrssituationen. Für die Realisierung des im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen elektronischen Copiloten wird daher vorgeschlagen, sowohl die Absicht als auch das Situationsbewusstsein des Fahrers unabhängig voneinander zu modellieren. Gegenüber diskriminativen Ansätzen, die für gegebene Sensordaten direkt eine Kritikalität der jeweiligen Verkehrssituation ermitteln, hat dies den Vorteil, dass die zugehörigen Modelle anhand von unkritischen Situation angeleert und daraufhin auf kritische Situationen verallgemeinert werden können.

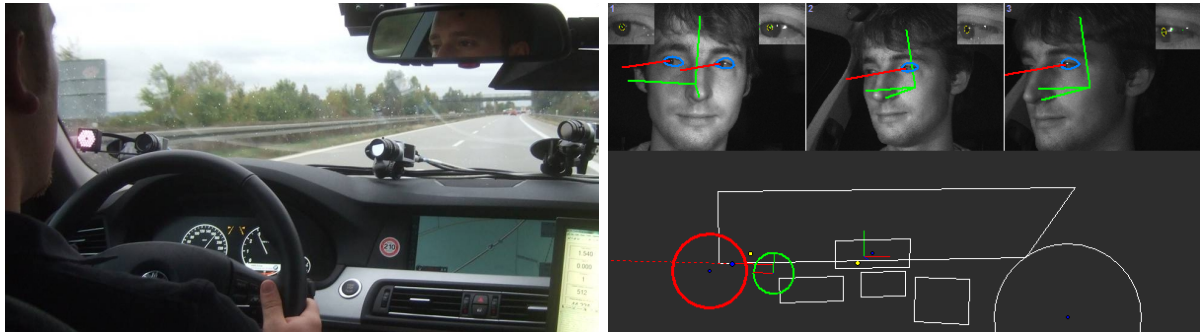


Abbildung 2: Eye-Tracking System im Fahrzeug (links) sowie erkannte Blickvektoren und aktive Area of Interest bei Blick in den linken Außenspiegel (rechts).

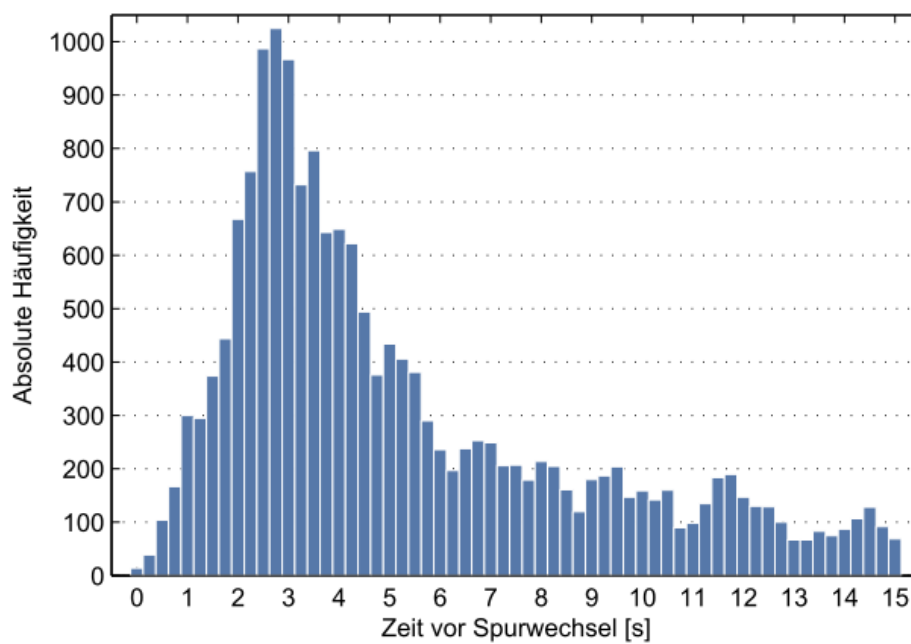


Abbildung 3: Zeitliche Verteilung aller Blicke in den linken Außenspiegel innerhalb der letzten 15 s vor dem nächsten Fahrstreifenwechsel.

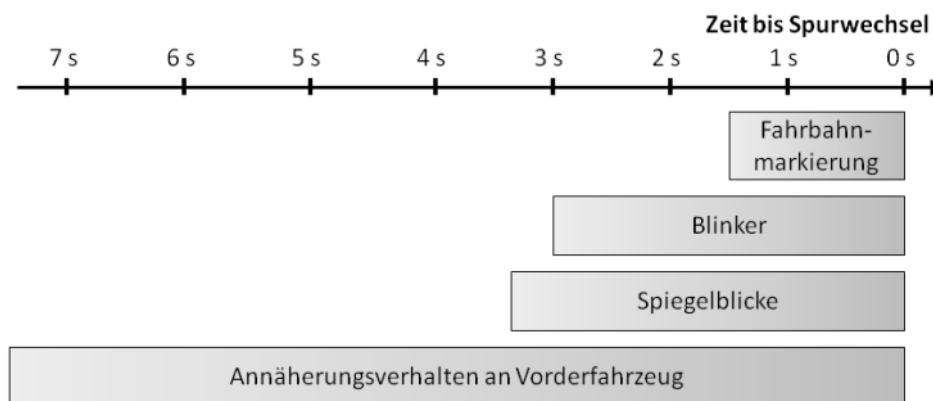


Abbildung 4: Aus der Analyse der Messdaten sowie den Ergebnissen eines RVM-basierten Klassifikators abgeleitete Vorhersagepotenziale ausgewählter Merkmale.

2.2 Situationsbewusstsein des Fahrers

Bei dem in [7] verfolgten Ansatz wird aufgrund dieser Überlegungen zwischen dem Erkennen einer Spurwechselabsicht und der Durchführbarkeitsentscheidung, die der Fahrer auf Basis seines Situationsbewusstseins fällt, unterschieden. Abb. 5 verdeutlicht das Konzept. Anhand der in Abb. 4 zusammengestellten Merkmale wird mittels einer RVM zunächst die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der der Fahrer zu diskreten Hypothesenzeitpunkten $t_H = 1..5\text{s}$ einen Fahrstreifenwechsel durchführen möchte. Unabhängig davon wird das Situationsbewusstsein des Fahrers zum Zeitpunkt der endgültigen Spurwechselentscheidung, hier mit $t_E = t_H - 1\text{s}$ angenommen, modelliert.

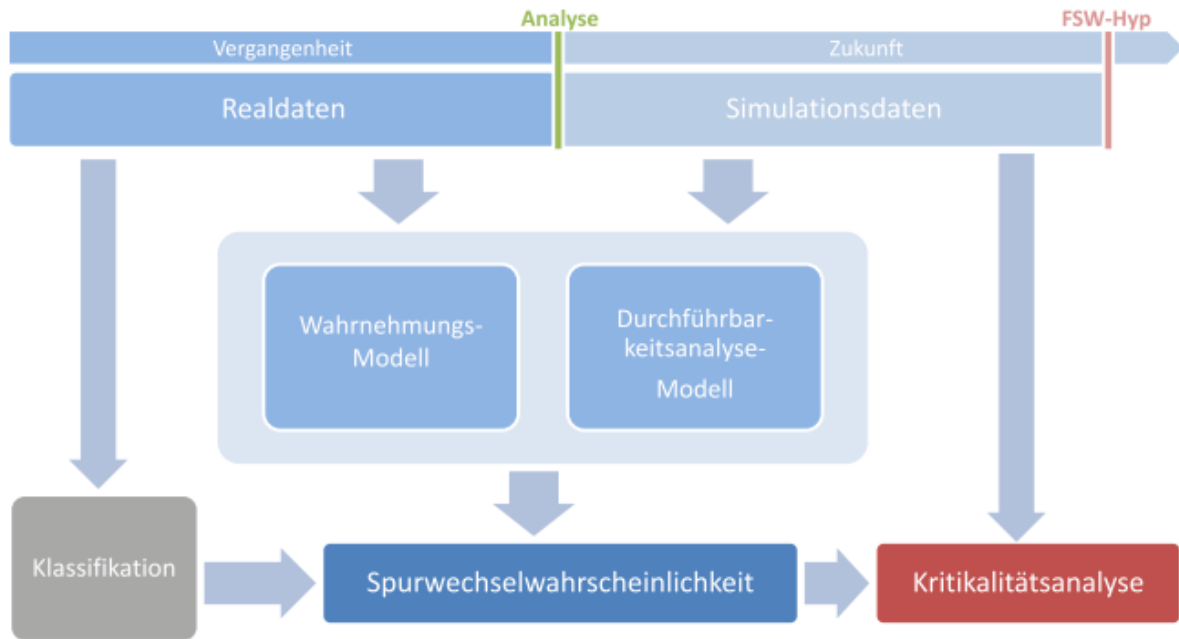


Abbildung 5: Fahrermodellbasierter Ansatz zur Risikobewertung von Fahrstreifenwechseln. Die Wahrscheinlichkeit der Durchführung geplanter Fahrstreifenwechsel hängt sowohl von den bisherigen als auch von den zukünftigen Spiegelblicken des Fahrers ab.

Da t_E für $t_H = 2..5\text{s}$ in der Zukunft liegt, sind Spiegelblicke, die bis zu diesem Zeitpunkt noch erfolgen, bei der Schätzung des Situationsbewusstseins probabilistisch zu berücksichtigen. Dabei ist zu beachten, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung für weitere Spiegelblicke davon abhängt, ob und wann bereits Blicke registriert worden sind. Für die Spurwechselentscheidung des Fahrers ist insbesondere der Zeitpunkt des letzten Spiegelblicks vor t_E relevant. Für 0, 1 und 2 bereits erfolgte Spiegelblicke wurden die zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus der in Abb. 3 dargestellten a-priori Verteilung extrahiert. Für den Fall, dass bis zum aktuellen Zeitpunkt t_0 noch kein Spiegelblick registriert worden ist, sind diese in Abb. 6 dargestellt.

Anhand der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Blickzeitpunkte wird im nächsten Schritt für jede der Spurwechselhypothesen bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Fahrer nachfolgende Fahrzeuge wahrgenommen hat. Dazu wird anhand des von der 360°-Rundumerfassung bereitgestellten Umfeldmodells sowie dem Sichtbereich des linken Außenspiegels überprüft, ob zu den Blickzeitpunkten eine Verdeckungssituation vorlag bzw. wie gut das jeweilige Fahrzeug zu diesem Zeitpunkt sichtbar war. Blickzeitpunkte,

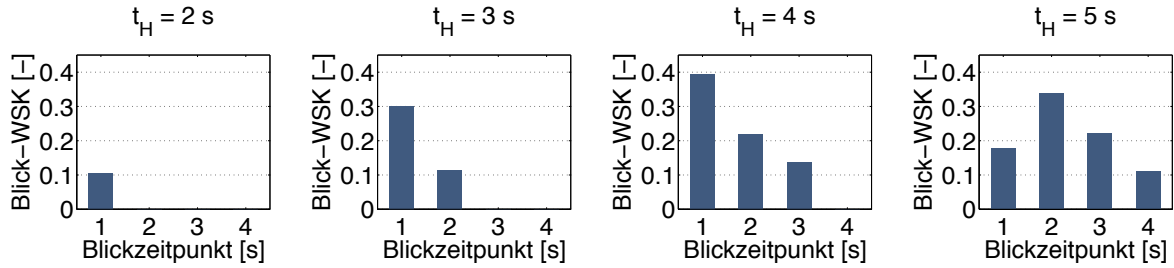


Abbildung 6: Wahrscheinlichkeitsverteilung zukünftiger Spiegelblicke in Abhängigkeit vom Zeitpunkt t_H eines hypothetischen Fahrstreifenwechsels, falls zum aktuellen Zeitpunkt t_0 noch kein Spiegelblick erfolgt ist.

die in der Zukunft liegen, werden durch Vorwärtssimulation berücksichtigt. Hierbei wird von einer konstanten Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer ausgegangen.

Zusätzlich zur Sichtbarkeit wird die Schätzung der Relativgeschwindigkeit anderer Verkehrsteilnehmer modelliert. Studien haben ergeben, dass Fahrer große Relativgeschwindigkeiten generell unterschätzen [8]. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Streuung der Geschwindigkeitsschätzung abnimmt, wenn der Fahrer mehrfach in den Spiegel schaut. Zum Entscheidungszeitpunkt t_E hat der Fahrer somit eine Vermutung hinsichtlich des Abstands und der Relativgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs, die sich auf seine Geschwindigkeitsschätzung und den Abstand des Fahrzeugs zum Zeitpunkt des letzten Spiegelblicks stützt. Je länger der letzte Blick zurückliegt, desto ungenauer ist demnach seine Schätzung und desto größer das Risiko, dass er die Situation falsch einschätzt.

Inwieweit dies in der jeweiligen Situation tatsächlich zu einer Gefährdung führt, wird im Rahmen einer abschließenden Kritikalitätsanalyse überprüft, die, wiederum basierend auf einer Vorwärtssimulation mit konstanter Geschwindigkeit, die die dem nachfolgenden Fahrzeug zugemutete Verzögerung gewichtet mit der Durchführungswahrscheinlichkeit des Fahrstreifenwechsels als Kritikalitätsmaß verwendet.

2.3 Beispielszenario

In Abb. 7 ist die Ausgabe des Systems beispielhaft für die Verdeckungssituation aus Abb. 1 dargestellt. Da bei der Messdatenaufnahme keine gefährlichen Situationen herbeigeführt werden konnten, wurde das Motorrad erst im Nachhinein als virtuelles Risikofahrzeug in einen bestehenden Datensatz eingefügt. Dieses nähert sich mit einer Differenzgeschwindigkeit von 15 m/s dem eigenen Fahrzeug, dessen Fahrer bei $t = 8.5$ s einen Fahrstreifenwechsel durchführt, um ein langsames Vorderfahrzeug zu überholen. Zeitlich ist die Situation so abgestimmt, dass das Motorrad zur Unfallvermeidung eine Vollbremsung mit ca. 10 m/s^2 durchführen müsste.

Kritisch wird die Situation insbesondere dadurch, dass das Motorrad erst 3 Sekunden vor dem geplanten Spurwechselzeitpunkt für den Fahrer sichtbar wird. Obwohl zu diesem Zeitpunkt bereits absehbar ist, dass der Fahrer bei $t = 8.5$ s einen Fahrstreifenwechsel durchführen möchte, gibt der 3-Sekunden-Klassifikator eine mit 50% ($t_H = 3$ s, $t = 5.5$ s) noch vergleichsweise geringe Kritikalität aus, da davon ausgegangen wird, dass der Fahrer wahrscheinlich noch einmal in den Spiegel schauen wird. Da dieser Fall jedoch nicht eintritt, steigt die Kritikalität beim 2-Sekunden-Klassifikator auf 65% ($t_H = 2$ s, $t = 6.5$ s) und beim 1-Sekunden-Klassifikator auf 90% ($t_H = 1$ s, $t = 7.5$ s).

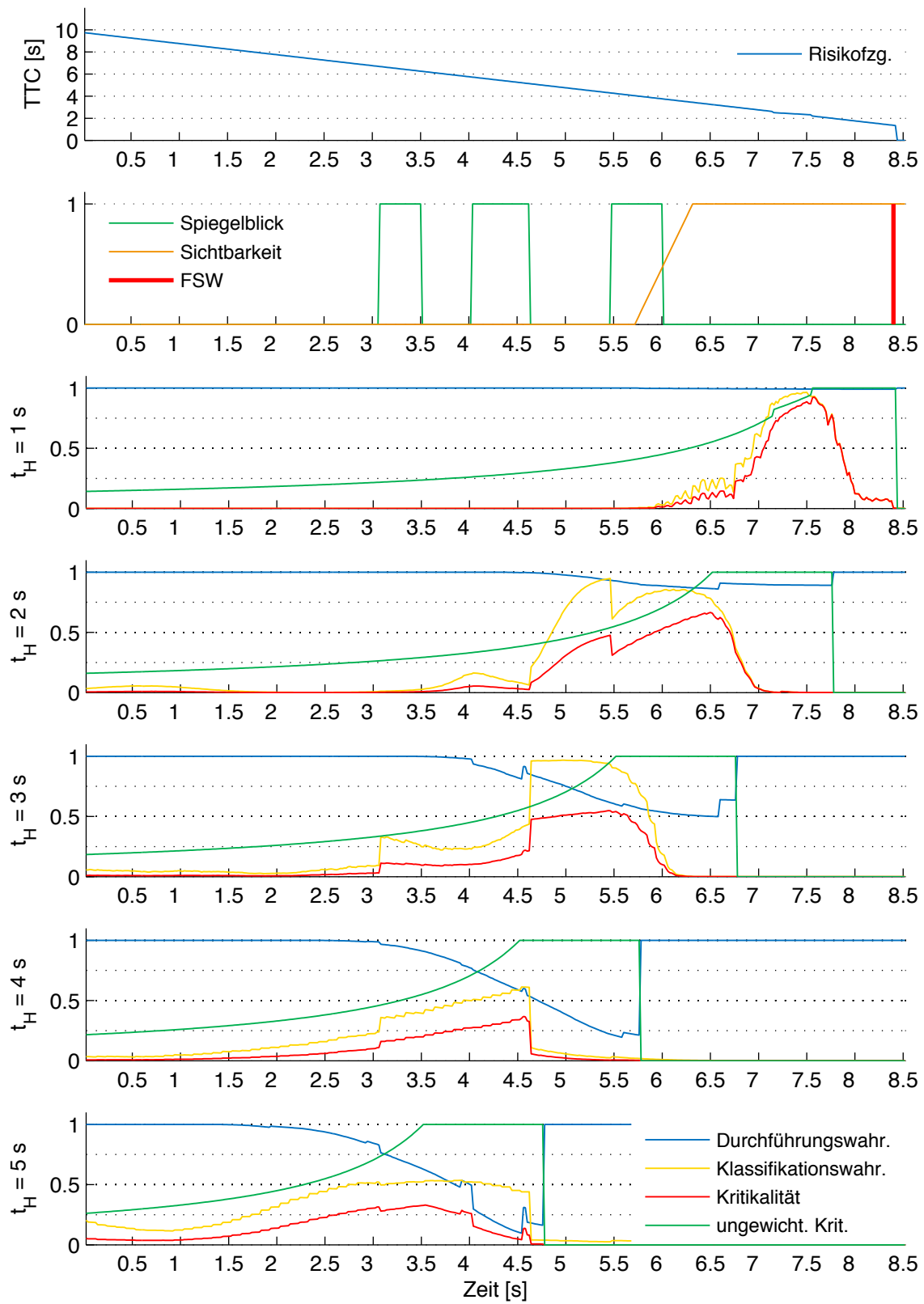


Abbildung 7: Ergebnis der Situationsinterpretation für eine Verdeckungssituation.

3 Situationsinterpretation im Kreuzungsbereich

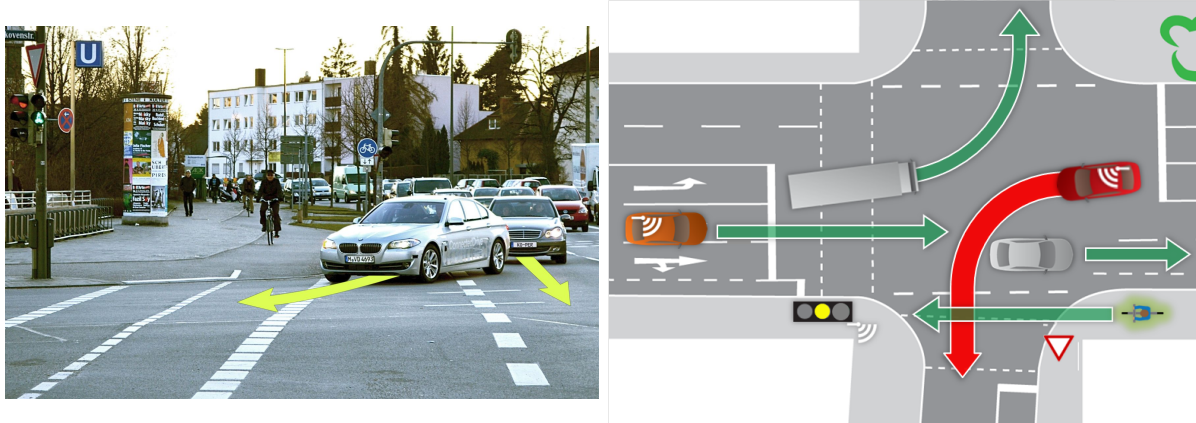


Abbildung 8: Beispielszenarien Kreuzung.

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Methodik lässt sich in ihren Grundzügen auch auf Situationen im Kreuzungsbereich anwenden. Abb. 8 zeigt zwei typische Szenarien: Das Rechtsabbiegen in Gegenwart eines sich parallel zur Straße bewegendes Radfahrers, und das Linksabbiegen bei Gegenverkehr. Die zweite Situation wird dadurch kritisch, dass die Aufmerksamkeit des Fahrers durch den an der Ampel anhaltenden Gegenverkehr gebunden wird und dieser den teilweise durch die B-Säule verdeckten Radfahrer dadurch möglicherweise übersieht.

In beiden Fällen lässt sich aus dem Blickverhalten des Fahrers ableiten, wie wahrscheinlich es ist, dass er den Radfahrer gesehen hat. Insbesondere dann, wenn der Fahrer überhaupt nicht in die Richtung des Radfahrers schaut, oder dieser zum Zeitpunkt des Blickes noch vollständig verdeckt war, kann das Informationsdefizit des Fahrers eindeutig als solches identifiziert und durch eine entsprechende Warnung behoben werden.

Darüber hinaus kann das Blickverhalten des Fahrers auch als Indikator für dessen Handlungsabsicht herangezogen werden. Im Rahmen eines Fahrversuchs bei BMW wurden dazu Blickrichtung und Kopfdrehung von 5 Probanden bei je 5-10 Rechtsabbiege- und Geradeausfahrten an der in Abb. 8 links dargestellten Kreuzung aufgezeichnet. Abb. 9 zeigt die Ergebnisse. Die Nullmarke der Abszisse entspricht hierbei der Distanz, bei der der im Bild dargestellte Radweg beim Rechtsabbiegen erreicht wird bzw. würde. Die eingetragenen TTC-Werte sind lediglich als Orientierung gedacht und sind über alle Überfahrten gemittelt. Offenbar lassen sich Rechtsabbiege- und Geradeausfahrten allein durch Abfrage des Merkmals, ob innerhalb der letzten drei Sekunden ein Blick nach rechts stattgefunden hat, bereits 2 Sekunden vor Erreichen des Radweges recht gut voneinander unterscheiden.

Interessant ist auch, dass sich die Kopfdrehung mindestens ebenso gut als Merkmal für die Intentionserkennung zu eignen scheint wie die deutlich schwerer zu beobachtende Blickrichtung des Fahrers. Für die Vorhersage von Fahrstreifenwechseln sind in [9] ähnliche Ergebnisse berichtet worden. Allerdings ist zu vermuten, dass die Kenntnis der genauen Blickrichtung des Fahrers Vorteile bei der Modellierung von dessen Situationsbewusstsein mit sich bringt. Inwieweit dies tatsächlich der Fall ist, bleibt Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

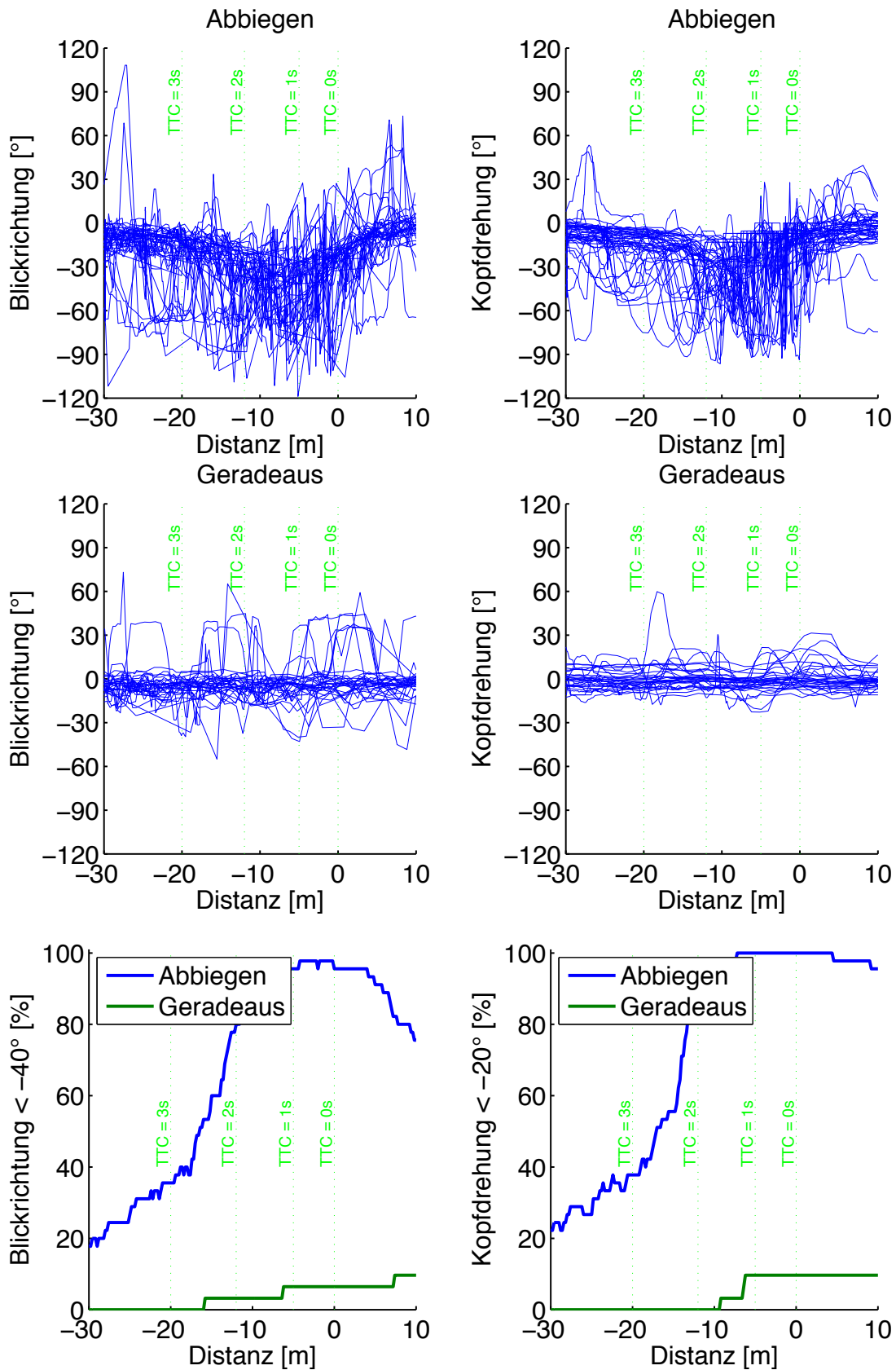


Abbildung 9: Blickverhalten und Kopfdrehung beim Rechtsabbiegen sowie das Ergebnis der Merkmalsgenerierung basierend auf dem Fahrerverhalten der letzten 3 Sekunden.

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Manuskript wurde eine Assistenz in Form eines elektronischen Copiloten vorgeschlagen, der auf Basis von Annahmen über das Situationsbewusstsein des Fahrers über die Notwendigkeit einer Warnung entscheidet. Die Grundzüge des Konzepts wurden am Beispiel eines Fahrstreifenwechsellassistenten diskutiert und anschließend auf die Situationsinterpretation im Kreuzungsbereich übertragen.

Dabei wurde die Notwendigkeit hervorgehoben, Absicht und Situationsbewusstsein des Fahrers getrennt voneinander zu modellieren, um diese anhand des Verhaltens von Fahrern in unkritischen Situationen anlernen und danach auf kritische Situationen verallgemeinern zu können.

Anhand zweier Probandenstudien wurde gezeigt, dass das Absicherungsverhalten des Fahrers nicht nur Rückschlüsse auf dessen Situationsbewusstsein zulässt, sondern auch als Indikator für seine Handlungsabsicht herangezogen werden kann. Hinsichtlich der Risikobewertung von Verkehrssituationen haben Absicht und Situationsbewusstsein des Fahrers oft einen gegensätzlichen Einfluss. Um diese sorgfältig gegeneinander abwägen zu können, sind weitere Untersuchungen zur Situationswahrnehmung des Fahrers unabdingbar.

Literatur

- [1] J. H. Schneider, “Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme,” Ph.D. dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2009.
- [2] “GIDAS - German In-Depth Accident Study,” 2011.
- [3] “Reviere der Blinkmuffel,” Auto Club Europa, Tech. Rep., 2008.
- [4] B. Morris, A. Doshi, and M. Trivedi, “Lane Change Intent Prediction for Driver Assistance : On-Road Design and Evaluation,” in *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2011, pp. 895–901.
- [5] M. J. Henning, “Preparation for lane change manoeuvres : Behavioural indicators and underlying cognitive processes,” Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2010.
- [6] S. Bayerl, “Kontextbasierte Vorhersage von kritischen Fahrstreifenwechseln,” Masterarbeit, Fachhochschule Deggendorf, 2012.
- [7] L. Kutschat, “Situationsinterpretation und probabilistische Risikobewertung von Fahrstreifenwechseln auf der Autobahn,” Bachelorarbeit, Hochschule München, 2012.
- [8] M. Mann, *Benutzerorientierte Entwicklung und fahrergerechte Auslegung eines Querführungsassistenten*. Göttingen: Audi Dissertationsreihe. Cuvillier Verlag, 2007.
- [9] A. Doshi and M. Trivedi, “A comparative exploration of eye gaze and head motion cues for lane change intent prediction,” in *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2008, pp. 49–54.