

Vorausberechnung der Trajektorien von Fahrzeugen an städtischen Knotenpunkten

Tobias Schendzielorz, Paul Mathias und Fritz Busch

Verfasserschriften:

Dipl.-Ing. T. Schendzielorz,
Heusch/Boesefeldt GmbH,
Niederlassung München,
Zenettstraße 34,
80337 München,
tobias.schendzielorz@
heuboe.de;
Dr. P. Mathias,
MAT.TRAFFIC,
Buchkremerstr. 4,
52062 Aachen,
paul.mathias@mat-traffic.de;
Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Busch,
Technische Universität
München,
Lehrstuhl für Verkehrstechnik,
Arcisstraße 21,
80333 München,
fritz.busch@tum.de

Der vorliegende Artikel beschreibt ein Online-Verfahren der straßenseitigen Infrastruktur, mittels dessen die Fahrmanöver von Fahrzeugen an einer städtischen Kreuzung vorausberechnet werden können. Die zugrunde liegenden Algorithmen nutzen sowohl fahrzeuggenerierte Daten als auch Zustände von Lichtsignalsteuerung und Verkehrsdetektoren, um den weiteren Verlauf der Fahrzeugtrajektorien präzise zu bestimmen und zueinander in Beziehung zu setzen. Ein Prototyp des Verfahrens wurde zunächst in einer Mikrosimulationsumgebung und später im realen Testfeld mit entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen getestet und validiert. Im Rahmen des Forschungsprojekts SAFESPOT wurde der Ansatz als Bestandteil der Applikation IRIS erfolgreich eingesetzt, um frühzeitig gefährliche Situationen zu erkennen und die betroffenen Verkehrsteilnehmer zu warnen.

The article presents a method to predict the manoeuvres of vehicles at an urban intersection. The core intelligence of this cooperative system is located in the traffic light controller. In order to estimate manoeuvres, the algorithms use probe vehicle data, the current and future status of the traffic light control and data provided by infrastructure-based sensors. A prototype of the system was tested and validated first using data provided by a microscopic traffic simulation and second at a real intersection with equipped vehicle transmitting probe data. In the research project SAFESPOT, this approach was integrated successfully as a core component of the application IRIS to identify safety critical situations before they occur and to warn the impacted driver.

1 Einleitung

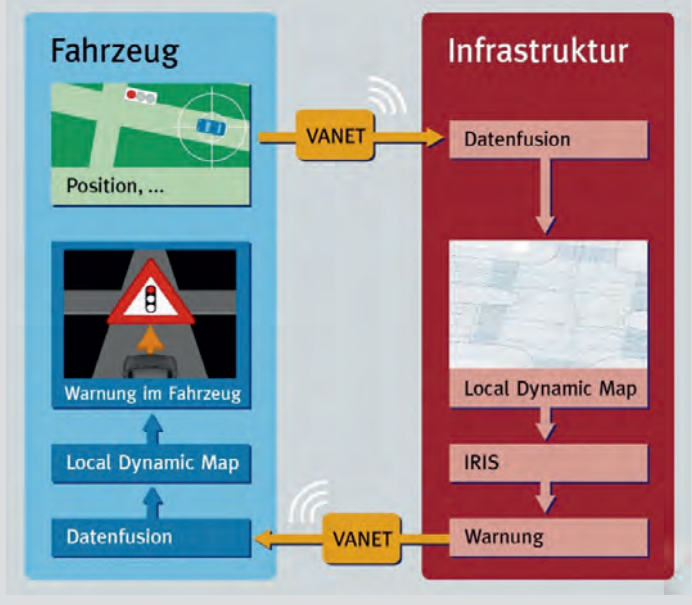
In den letzten Jahren hat der Einfluss moderner Kommunikationstechnologien im Bereich Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) stark zugenommen und ein Spektrum neuartiger Anwendungen ermöglicht. In einer Vielzahl an Forschungsprojekten wurden und werden diese Anwendungen erprobt. Im Bereich der Standardisierung der Datenübertragung, welche unabdingbar für deutschland- bzw. europaweite Markteinführung dieser Systeme ist, werden Erfolge erzielt. Im Zuge dieses Vorschreitens haben sich auch Anwendungen herauskristallisiert, welchen man ein hohes Realisierungspotenzial zu Beginn der Einführung von kooperativen Systemen zuspricht. Zu nennen sind hier beispielsweise Warnung der Autofahrer vor einem Stauende, einer Baustelle oder sonstigen Gefahrenstellen bei der Fahrt auf einer Autobahn. Im städtischen Verkehr spielen die Übertragung der Schaltzustände einer Lichtsignalanlage (LSA) und die Warnung vor einem herannahenden Einsatzfahrzeug als Einführungsanwendung eine entscheidende Rolle, wie dies derzeit in der Forschungsinitiative UR:BAN des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

weiter in Richtung einführungsfähiger Dienstleistungen vorangetrieben wird [1].

Im Gegensatz zum Autobahnverkehr wird der Warnung vor Gefahren im städtischen Umfeld, wenn man einmal vom Szenario „Einsatzfahrzeug“ absieht, als Einführungsanwendung eine eher geringe Bedeutung zugesprochen. Dies liegt sowohl an der Komplexität von städtischen Kreuzungssituationen als auch an der noch nicht zu Hundert Prozent verlässlichen Technologie im Zusammenspiel der unterschiedlichen Komponenten bei kooperativen Systemen. Kann bei einem Ausfall einer Komponente das Funktionieren der Anwendung nicht mehr gewährleistet werden, so stellt dies ein nicht zu unterschätzendes Sicherheitsrisiko für die beteiligten Verkehrsteilnehmer dar. Die damit einhergehenden möglichen rechtlichen Folgen sind nicht abschließend diskutiert. Ebenso sind Fragen nach Geschäfts- bzw. Finanzierungsmodellen bei der notwendigen Ausrüstung der straßenseitigen Infrastruktur noch nicht beantwortet. Es ist somit offensichtlich, dass technisch komplexere kooperative Anwendungen zur Verbesserung der Sicherheit auf städtischen Knotenpunkten noch nicht reif für eine Markteinführung sind. Dass es aber Bedarf

an derartigen Anwendungen gibt, belegen die Zahlen des statistischen Bundesamts. Etwa zwei Drittel aller Verkehrsunfälle in Deutschland, welche zu Verletzungen führen oder sogar tödlich enden, ereignen sich im städtischen Umfeld, obwohl städtische Straßen weniger als ein Viertel der gesamten Straßenlänge Deutschlands ausmachen [2]. Auch untermauern die Zahlen von Schreiber in [3] diesen Bedarf. Schreiber berichtet, dass jede vierte im innerörtlichen Straßenverkehr verunglückte Person ein Radfahrer ist und dass das Risiko eines Personenschadens bei Abbiegeunfall mit Beteiligung eines Radfahrers sechsmal höher ist als im gesamten Unfallgeschehen. Die zunehmende Beliebtheit des Rads als Transportmittel in den deutschen Städten dürfte hier noch verstärkend wirken. Der vorliegende Beitrag beschreibt ein kooperatives System, welches die Trajektorien von Fahrzeugen und Radfahrern an einem städtischen Knotenpunkt abschätzt und vorausberechnet und somit in der Lage ist, vor sich anbahnenden Kollisionen zu warnen. Das vorgestellte System IRIS (Intelligent Cooperative Intersection Safety) berücksichtigt auch die Anwesenheit von Fußgängern, berechnet aber deren Trajektorien nicht voraus. Basis des

Bild 1: Zusammenspiel Fahrzeug und straßenseitige Infrastruktur im Überblick [4]



Systems ist der Austausch von Informationen von Fahrzeugen mit der straßenseitigen Infrastruktur. Dieser Datenaustausch erfolgt bidirektional. Die Fahrzeugdaten, wie Position und Geschwindigkeit, werden in einer Rechneinheit, welche an der Lichtsignalanlage (LSA) zusätzlich vorhanden sein muss, verarbeitet und durch weitere Daten aus Steuergerät und zusätzlichen Sensoren ergänzt. Wurde eine gefährliche Situation identifiziert, wird eine entsprechende Warnung an das betreffende Fahrzeug gesendet.

Im Folgenden werden zunächst das System, die einzelnen Prozesse und die abgedeckten Szenarien im Überblick beschrieben. Anschließend wird auf die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, ein bestimmtes Manöver zu fahren, und die Vorausberechnung der Ausprägung der Trajektorien eingegangen. Der Beitrag schließt mit der Bewertung der Teilkomponente, welche die Trajektorien abschätzt und der Erprobung des Gesamtsystems an einem realen Knotenpunkt ab.

2 Gesamtsystem im Überblick

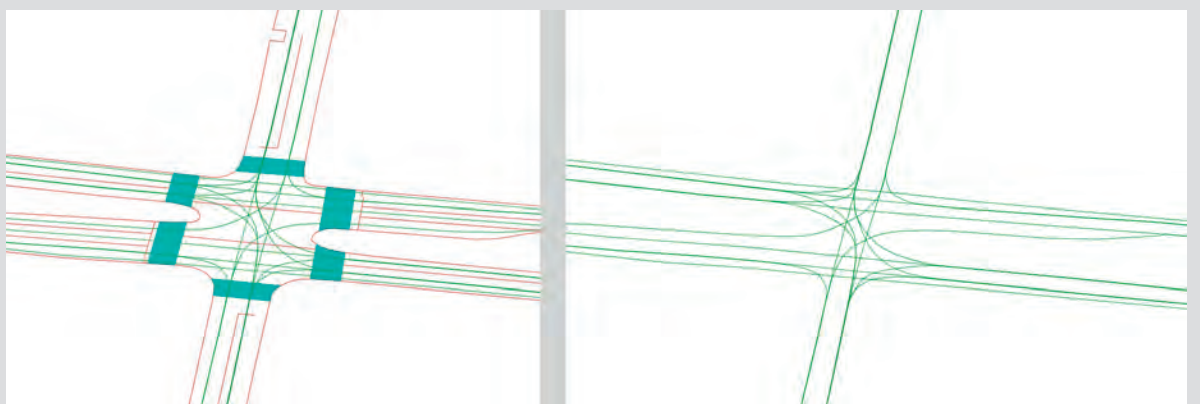
Mittels des Austauschs von Informationen zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen und der Anbringung moderner Detektionseinrichtungen an einem städtischen Knotenpunkt ist es möglich, neue Anwendungen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auszuloten. Es besteht durch diese neuen Technologien die Möglichkeit, den Wahrnehmungshorizont der Autofahrer zu vergrößern und damit die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Das hier vorgestellte System IRIS (Intelligent Cooperative Intersection Safety) identifiziert sicherheitskritische Situationen, indem es die Trajektorien der Fahrzeuge und Radfahrer vorausberechnet und die sich entwickelnde Situation analysiert und bewertet. Bild 1 zeigt das nachfolgend beschriebene Gesamtsystem im Überblick.

Die die Kreuzung passierenden Fahrzeuge übermitteln, sobald sie in Kommunikationsreichweite sind, ihre Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrtrich-

tung und Blinkerstatus an eine zusätzlich an der straßenseitigen Infrastruktur verbaute Kommunikationseinheit. Die drahtlose Datenübertragung erfolgt mittels eines sich adhoc aufbauenden Kommunikationsnetzwerks (Vehicular Ad-hoc Network – VANET) gemäß IEEE 802.11p WLAN-Standard. Zur Zeit der Entwicklung des Verfahrens waren die Standardisierungsaktivitäten im Bereich der V2X-Kommunikation noch nicht so weit fortgeschritten, sodass beim Datenübertragungsprotokoll ein proprietäres Format basierend auf der amerikanischen "Basic Safety Message", welche im SAE-Standard J2735 definiert ist, genutzt wurde. Erfahrungen im Umgang mit dem Datenprotokoll konnten aber in die nachfolgenden Standardisierungsprozesse mit eingespeist werden und sind mittlerweile in Release 1 der ETSI "Cooperative Awareness Message" (CAM) veröffentlicht [5].

In einer weiteren Rechneinheit, welche mit dem Steuergerät der Lichtsignalanlage verbunden ist, werden die Fahrzeugdaten mit den Informationen über die Signalsteuerung, der Geometrie der Kreuzung und Daten aus den zusätzlichen Sensoren, welche Fahrräder und Fußgänger detektieren, kombiniert. Die geometrische Beschreibung der Kreuzung mit Anzahl Fahrstreifen und Verortung der Haltlinien hält die sogenannte Local Dynamic Map (LDM) vor [6]. Die LDM ist eine GIS-Datenbank, die auf einer statischen digitalen Karte basiert, wie sie in Navigationssystemen eingesetzt wird. Diese Karte wurde mit zusätzlichen Attributen, wie z. B. der Verortung der Haltlinie angereichert. Des Weiteren bietet die LDM die Möglichkeit, dynamische Objekte wie z. B. das Vorhandensein von Nebel abzuspeichern. Aber auch bewegliche Objekte, wie Fahrzeuge, können mit ihren entsprechenden Attributen gespeichert und schnell wieder zur Verfügung gestellt werden. Mithilfe dieser

Bild 2: Abbildung der Reference Tracks an einer Kreuzung



verarbeiteten Informationen werden im nächsten Schritt (Teilkomponente „Situation Refinement“) die Trajektorien vorausberechnet. Anschließend wird die sich abzeichnende Situation im Verfahrensschritt „Threat Assessment“ interpretiert. Falls notwendig, wird eine entsprechende Nachricht generiert und an das Fahrzeug des zu warnenden Fahrers versendet. Im Fahrzeug wird die Gültigkeit der Nachricht geprüft und die Information zur Anzeige gebracht.

Die Anwendung IRIS kann zur Unterstützung für den Fahrer in folgenden Situationen eingesetzt werden:

- Rotlichtmissachtung: Rechtzeitiges Erkennen eines Rotlichtverstößes und Warnung der betroffenen Fahrzeuge an einer Kreuzung
- Rechtsabbiegen: Erkennen einer kritischen Situation mit einem Fahrradfahrer oder Fußgänger beim Rechtsabbiegen
- Linksabbiegen: Erkennen einer kritischen Situation beim Linksabbiegen, bei welchem sich zwei bedingt verträgliche Verkehrsströme kreuzen.

3 Schätzung der Fahrmanöver eines Fahrzeugs

Die Schätzung der Manöver der Fahrzeuge an der Kreuzung hat die Aufgabe, jedem Fahrzeug ein oder mehrere mögliche Fahrmanöver zuzuordnen und mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit zu versehen. Hierzu werden die Positionen der Fahrzeuge sogenannten „Reference Tracks“ zugeordnet. Ein Reference Track (RT) ist die geometrische Beschreibung einer Trajektorie, welche ein Fahrzeug beim Queren oder Abbiegen an einer Kreuzung beschreibt. Der Reference Track bildet somit eine statische Bezugslinie für die Ermittlung eines Fahrmanövers. Für jedes Fahrmanöver ist ein RT notwendig, der sich bestenfalls über die gesamte Größe des Kommunikationsbereiches ausdehnt. Dieser kann je nach örtlicher Situation (Bebauung etc.) bis zu 500 m betragen. Die Vorstellung, dass es sich um eine einzelne Linie handelt, die die Fahrzeuge z. B. beim Abbiegen beschreiben, ist idealisiert. In der Realität liegt vielmehr eine Schar von Kurven vor. Dies zeigt eindrücklich die Arbeit von Alhajyaseen, der in [7] die Trajektorien links abbiegender Fahrzeuge zum Zweck der Klothoiden-basierten Trajektorienvorausberechnung analysierte. Bild 2 stellt links die Reference Tracks (grün) und

die Fußgängerfurten (türkisblau) sowie die statischen Abgrenzungen der Kreuzung (dunkelrot), basierend auf den in der LDM gespeicherten Informationen, dar. Rechts sind nur die Reference Tracks gezeichnet. Die Schätzung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug ein bestimmtes Manöver ausführt, besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Teilen. Zunächst wird die sogenannte geometrische Wahrscheinlichkeit p_{ik}^{geo} bestimmt. Diese Wahrscheinlichkeit berücksichtigt lediglich den geometrischen Bezug der Position eines Fahrzeugs zum Reference Track und mit der Positionsbestimmung einhergehende Abweichungen.

Zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, p_{ik}^{geo} für ein Fahrzeug i , welches einem Reference Track k zugeordnet wurde, wird die Dichtefunktion der Position über die Fahrbahn und somit über den Fahrsteifen, welcher den Reference Track beinhaltet, gelegt und zur Ermittlung der zugehörigen Wahrscheinlichkeit abschnittsweise integriert. Bild 3 beschreibt grafisch das Konzept zur Berechnung der geometrischen Wahrscheinlichkeit.

Zur Integration wird die Fehlerfunktion nach Gauß als Hilfsfunktion (1) genutzt. Die Gleichungen (2) bis (4) beschreiben die einzelnen Berechnungsschritte, um, p_{ik}^{geo} zu

Ankündigung



Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2014

vom 30. September bis 2. Oktober 2014 in Stuttgart

mit begleitender Fachausstellung „Straßen und Verkehr 2014“



„Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2014“ der
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV)
mit der Fachausstellung „Straßen und Verkehr 2014“

vom 30. September bis 2. Oktober 2014
im ICS – Internationales Congresscenter Stuttgart

Kongress in den Räumen C1.1 und C1.2
Ausstellung in den Räumen C2, Foyer,
Messepiazza



Forschungsgesellschaft für Straßen-
und Verkehrswesen e. V. (FGSV)
An Lyskirchen 14 – 50676 Köln
Telefon: 0221 / 93 58 3-0 – Fax: 93 58 3-73
E-Mail: koeln@fgsv.de – Internet: www.fgsv.de



FGSV Verlag GmbH
Wesseling Str. 17 – 50999 Köln
Telefon: 0 22 36 / 38 46 30 – Fax: 38 46 40
E-Mail: info@fgsv-verlag.de
Internet: www.fgsv-verlag.de

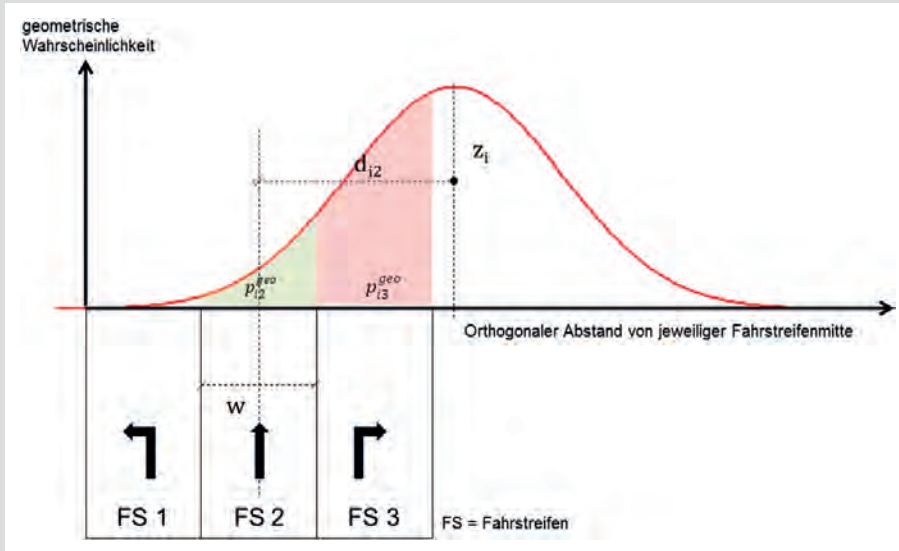


Bild 3: Grafische Darstellung der Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten

erhalten; mit, σ_i als Standardabweichung der Fahrzeugposition, z_i und, d_{ik} als senkrechten Abstand vom Reference Track k . Die Breite des Fahrstreifens w wird vereinfacht mit 3 m angenommen.

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (1)$$

$$F(z) = 0.5 \left(1 + \text{erf} \left(\frac{z-\mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \quad (2)$$

$$p_{ik}^{geo} = F(-0.5w) - F(0.5w) \quad (3)$$

$$p_{ik}^{geo} = 0.5 \left(\text{erf} \left(\frac{0.5w-d_{ik}}{(0.5w+\sigma_i)\sqrt{2}} \right) - \text{erf} \left(\frac{-0.5w-d_{ik}}{(0.5w+\sigma_i)\sqrt{2}} \right) \right) \quad (4)$$

Bis jetzt werden bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit nur der orthogonale Abstand und die Standardabweichung der Fahrzeugposition genutzt. Nach erfolgter geometrischer Zuordnung wird nun die Wahrscheinlichkeit p_{ik}^{geo} durch die Berücksichtigung zusätzlicher Informationen korrigiert.

Folgende Werte werden zusätzlich mit einbezogen:

- der Winkel ω_i zwischen Richtungsvektor des Fahrzeugs und der Richtung des Reference Tracks,
- die Standardabweichung der Richtung η_i des Fahrzeugs
- und der Status des Blinkers b_i des Fahrzeugs.

Ein großer Winkel ω_i zwischen Richtungsvektor und Richtung des RT wirkt sich mindernd auf den Betrag der Wahrscheinlichkeit aus, da das Fahrzeug sich auch auf einem anderen Fahrstreifen befinden könnte, gerade dabei ist, diesen zu wechseln oder sich, anstatt auf dem geradeaus

führenden Reference Track, auf dem rechtsbiegenden RT befindet. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird der Faktor $e^{-\omega_i^2}$ eingeführt. Dessen Einfluss wird durch den Faktor, $1/\eta_i^2$ im Exponenten abgemindert, da auch der Richtungsvektor gewissen Standardabweichungen unterliegt. D. h. je größer die Standardabweichung der Fahrzeurichtung ist, desto geringer wird der Einfluss der Fahrzeurichtung.

Abschließend wird noch der Status des Blinkers mit in der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit berücksichtigt. Jedem Blinkerstatus, b_i wird ein bestimmter Einflussfaktor, f_i^b entsprechend den Gleichungen (5) und (6) zugeordnet.

$$f_i^b(b_i \triangle \text{aus}) = 2,0 \quad (5)$$

$$f_i^b(b_i \triangle \text{links} \vee \text{rechts}) = 4,0 \quad (6)$$

Die Einflussfaktoren der Blinker stellen nur eine grobe Abschätzung dar und sind nicht durch ein zugehöriges Experiment bestätigt. Im Fall der Nutzung des Blinkers wird angenommen, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass das Fahrzeug abbiegt (größerer Faktor). Falls der Blinker nicht benutzt wird, besteht aber immer noch eine Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer ohne zu blinken abbiegt. Daher ist der Wert von $f_i^b(b_i \triangle \text{aus})$ kleiner als der von $f_i^b(b_i \triangle \text{links} \vee \text{rechts})$ aber nicht 0. Das heißt, ist der Blinker rechts gesetzt und ist das Fahrzeug einem Reference Track zugeordnet, der diesem Manöver zugrunde liegt, dann wird der Faktor $f_i^b(b_i \triangle \text{rechts})$ in die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit mit einbezogen. Ähnliches gilt für den links gesetzten Blinker. Wird kein Blinker genutzt und das Fahrzeug ist einem ge-

radeaus laufenden RT zugewiesen, dann wird der Faktor $f_i^b(b_i \triangle \text{aus})$ verwendet.

Die endgültige Wahrscheinlichkeit wird durch die Kombination der unterschiedlichen Faktoren gemäß Gleichung (7) bis (9) ermittelt und im letzten Schritt noch entsprechend Gleichung (10) normalisiert. Ein Fahrzeug kann theoretisch für mehrere Manöver auf unterschiedlichen RT eine Wahrscheinlichkeit zugewiesen bekommen, die in Summe aber 1 ergeben müssen. D. h., jede ermittelte Wahrscheinlichkeit für ein Fahrzeug i auf einem Reference Track k wird durch die Summe aller ermittelten Wahrscheinlichkeiten für dieses Fahrzeug i für alle Reference Tracks k einer Zufahrt h einer Kreuzung dividiert.

$$p_{ik} = p_{ik}^{geo} \cdot e^{-\frac{\omega_i^2}{\eta_i^2}} \cdot f_i^b(b_i \triangle \text{aus}) \quad \forall k \in g \quad (7)$$

mit $G = \{g \in G | g \triangle \text{RT führt gerade aus}\}$

$$p_{ik} = p_{ik}^{geo} \cdot e^{-\frac{\omega_i^2}{\eta_i^2}} \cdot f_i^b(b_i \triangle \text{links}) \quad \forall k \in l \quad (8)$$

mit $L = \{l \in L | l \triangle \text{RT führt nach links}\}$

$$p_{ik} = p_{ik}^{geo} \cdot e^{-\frac{\omega_i^2}{\eta_i^2}} \cdot f_i^b(b_i \triangle \text{rechts}) \quad \forall k \in r \quad (9)$$

mit $R = \{r \in R | r \triangle \text{RT führt nach rechts}\}$

$$p_{ik}^{norm} = \frac{p_{ik}}{\sum_k p_{ik}} \quad \forall k \in h, h \in H \quad (10)$$

mit $H = \{H \in H | h \triangle \text{Zufahrt Knotenpunkt}\}$

4 Vorausberechnung der Trajektorien

Nach Abschätzung der Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Fahrmanöver ist die Bewegung der Fahrzeuge entlang der Reference Tracks zu bestimmen. Die Vorausberechnung der Trajektorien erfolgt in 0,5-Sekundenintervallen und der Prognosehorizont ist mit 5 Sekunden festgelegt. Der Vorausberechnung werden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt:

- Die Prognose versucht, so weit wie möglich mit den Verkehrsregeln konform zu sein.
- Die Fahrzeuge bewegen sich entsprechend den physikalischen Grenzen, z. B. Abbremsvorgang vor dem Abbiegen zum Erreichen einer niedrigeren Geschwindigkeit.
- Das Modell betrachtet keine Kreuzkorrelationen von Fahrzeugen auf unterschiedlichen Reference Tracks, d. h. die Bewegungen von zwei Fahrzeugen auf zwei unterschiedlichen Reference Tracks sind unabhängig voneinander.
- Die Bewegung von zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen auf dem gleichen

Reference Track wird aber berücksichtigt.

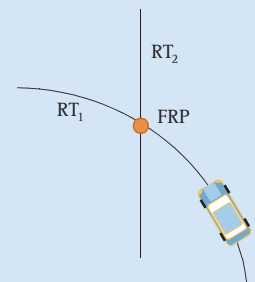
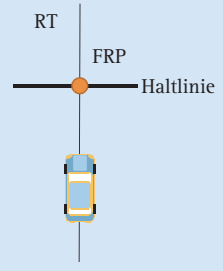
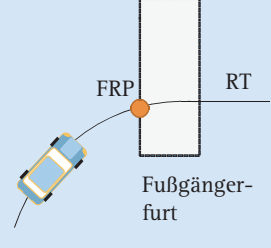
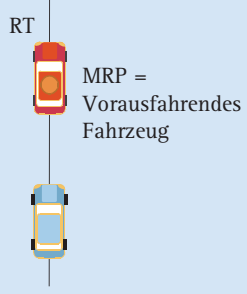
Zur Modellierung dieser Randbedingungen werden sogenannte "Resistance Points" (RP), Widerstandspunkte, eingeführt. Dabei wird zwischen fixierten (FRP) und beweglichen (MRP) Resistance Points unterschieden. Die fixierten RPs ergeben sich einzig aus der detaillierten geometrischen Beschreibung des Knotenpunkts. Die beweglichen RPs sind notwendig, um den Einfluss eines vorausfahrenden Fahrzeugs mit zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen gleicht einem stark vereinfachten Fahrzeugfolgemodell. Jeder RP liegt auf einem Reference Track (RT) und wird einer der folgenden Kategorien zugeordnet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die diversen Fallunterscheidungen.

Die RPs haben neben ihrer Position auf dem Reference Track noch weitere Attribute. Die sogenannte "required speed" v^{req} gibt die Geschwindigkeit vor, welche das Fahrzeug beim Erreichen des RPs haben soll. Eine weitere Information, die dem RP zugeordnet ist, ist die "driver awareness distance" d^{aw} . Diese Distanz gibt an, ab welcher Entfernung der RP mit dessen required speed für das herannahende Fahrzeug gültig ist. Sie besitzt einen Defaultwert von 50 m.

In Fall (1) in obiger Tabelle wird dem RP in Abhängigkeit vom Vorhandensein eines Fahrzeugs auf dem kreuzenden RT und der Entfernung des abbiegenden Fahrzeugs eine entsprechende required speed zugewiesen. Im Fall (2) ist die Geschwindigkeit an der Haltlinie bei ROT 0 km/h und bei GRÜN und ungehinderter Fahrt die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Fall (3) bildet die Situation beim Rechtsabbiegen ab. D. h. falls Fußgänger in der Furt erkannt werden, ist auch hier eine required speed von 0 km/h anzusetzen. Im Fall (4) handelt es sich um den beweglichen RP, d. h. beim Erreichen der awareness distance nimmt das folgende Fahrzeug die Geschwindigkeit des vorausfahrenden an. Ist der RP nicht vorhanden, wird dem Fahrzeug die zulässige Höchstgeschwindigkeit zugewiesen.

Nachdem alle RPs mit den entsprechenden zugehörigen required speeds ermittelt wurden, kann mit der eigentlichen Prognose der Trajektorien für jedes Fahrzeug i entlang des Reference Tracks k begonnen werden. Um den Rechenaufwand nicht zu groß werden zu lassen, werden nur Fahrzeugbewegungen für RT vorausberechnet, die eine Wahrscheinlichkeit von 0,15 nicht unterschreiten. Befindet sich

Tabelle 1: Übersicht der vier unterschiedlichen Resistance Point-Typen

<p>(1) Fixierter RP, der sich auf den Schnittpunkt zweier RTs bezieht.</p>	
<p>(2) Fixierter RP, der sich auf den Schnittpunkt eines RT mit einer Haltlinie bezieht.</p>	
<p>(3) Fixierter RP, der sich auf den Schnittpunkt von einem RT mit einer Fußgängerfurt bezieht.</p>	
<p>(4) Beweglicher RP, der die mögliche Position eines vorausfahrenden Fahrzeugs beschreibt.</p>	

das Fahrzeug i auf dem Reference Track k innerhalb der awareness distance eines Resistance Points r, so wird die notwendige Beschleunigung oder Verzögerung $a_{ikt+1}^{req,r}$ zum Erreichen der required speed dieses RPs für den Zeitpunkt t entsprechend der Gleichung (11) berechnet.

$$a_{ikt}^{req,r} = 0,5 \cdot \frac{(v_{ikt})^2 - (v_{ikt}^{req,r})^2}{d_{ikt}^r - 0,5l} \quad \forall i, k, r, t \quad (11)$$

$a_{ikt+1}^{req,r}$:= notwendige Beschleunigung oder Verzögerung eines Fahrzeugs i auf dem Reference Track k im Prognosezeitschritt t + 1, um die required speed des Resistance Points r einzuhalten

v_{ikt} := Geschwindigkeit des Fahrzeugs i auf dem Reference Track k im Prognosezeitschritt t

$v_{ikt}^{req,r}$:= required speed des Resistance Points r, der für das Fahrzeug i auf dem Reference Track k zum Prognosezeitschritt k gilt

d_{ikt}^r := Entfernung des Fahrzeugs i vom Resistance Point r auf dem Reference Track k im Prognosezeitschritt t

l := Fahrzeuglänge, wird mit 4 m angenommen.

Auf einem RT können mehrere RPs liegen, die für ein Fahrzeug Gültigkeit besitzen. Daher ist zu entscheiden, welche der ermittelten notwendigen Beschleunigungen für das Fahrzeug maßgebend ist. Gleichung (12) beschreibt die Entscheidungslogik. D. h. wenn die ermittelte Beschleunigung negativ ist, dann ist aus der Menge der ermittelten Beschleunigungen für alle RPs eines Fahrzeugs auf einem Reference Track die geringste auszuwählen, unter der Berücksichtigung, dass die maximale Bremsbeschleunigung a_{min} des Fahrzeugs nicht überschritten wird. Liegen positive Beschleunigungen vor, so gilt ein ähnliches Vorgehen und es ist darauf zu achten, dass die maximale Beschleunigung des Fahrzeugs a_{max} nicht überschritten wird.

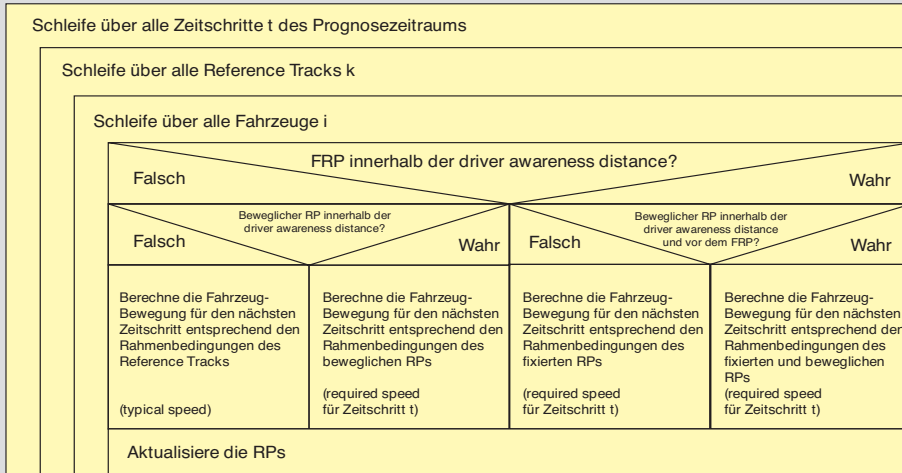


Bild 4: Struktogramm der Prognose der Trajektorien



Bild 5: Kreuzung Hamburger Straße/Gerichtsstraße

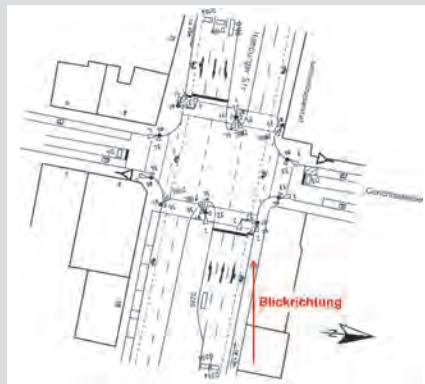


Bild 6: Lageplan des Kreuzung

Bild 7: Knotenpunktmodell in VISSIM

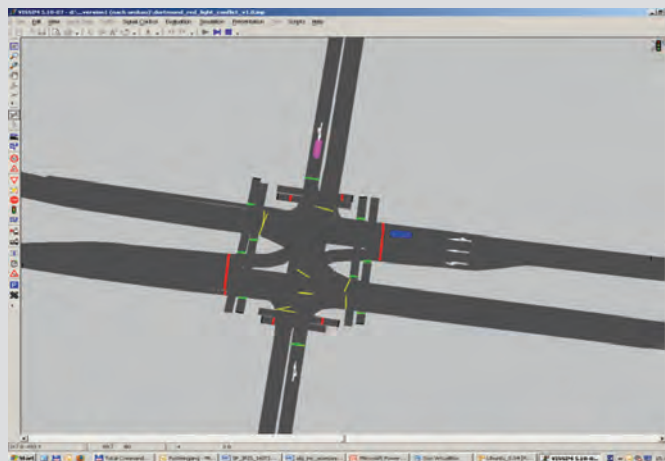


Bild 8: Visualisierung mit Trajektorien und Warnungsanzeige



$$a_{ikt+1}^{req,r} := \begin{cases} \max(\min_r(a_{ikt+1}^{reg,r}), a_{min}) \cdot a_{ikt+1}^{req,r} < 0 \\ \max(\max_r(a_{ikt+1}^{reg,r}), a_{max}) \cdot a_{ikt+1}^{req,r} \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$\forall i, k, r, t$

Ist die entsprechende Beschleunigung ermittelt, so kann die Entfernung $d_{i,k,t+1}$ berechnet werden, die das Fahrzeug im nächsten Zeitschritt $t+1$ zurücklegen muss, und die entsprechende Geschwindigkeit $v_{i,k,t+1}$. Siehe hierzu Gleichungen (13) und (14) mit Δt als Zeitschritt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Prognosezeitschritten.

$$d_{i,k,t+1} = v_{ikt} \cdot \Delta t + 0,5 a_{ikt}^{req,r} \cdot \Delta t^2 \quad (13)$$

$$v_{i,k,t+1} = v_{ikt} + 0,5 a_{i,k}^{req,r} \cdot \Delta t \quad (14)$$

Das nachfolgende Struktogramm (Bild 4) stellt den gesamten Prozess der Vorausberechnung im Überblick dar. Für jeden Zeitschritt, jeden Reference Track und jedes Fahrzeug auf einem RT wird geprüft, ob ein fixierter RP innerhalb der driver awareness distance in Fahrrichtung voraus ist. Weiterhin ist zu prüfen, ob ein beweglicher RP, also ein anderes Fahrzeug, sich voraus befindet. Entsprechend den Rahmenbedingungen des RTs bzw. der RPs wird die benötigte Beschleunigung berechnet. Basierend auf den ermittelten Beschleunigungen werden die zurückzulegende Distanz und die Geschwindigkeit bestimmt.

Nach der Abschätzung der Fahrmanöver und der Vorausberechnung der Trajektorien wird die sich entwickelnde Situation bewertet. Hierzu wird überprüft, ob die Randbedingungen, die die Resistance Points vorgeben, entsprechend den fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs eingehalten werden können oder nicht. Ist dies nicht der Fall, wird eine Warnung an das Fahrzeug von der straßenseitigen Infrastruktur ausgesendet.

5 Versuche unter Laborbedingungen

Bevor die Anwendung IRIS am realen Knotenpunkt getestet werden konnte, wurden Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt. Ziel der Versuche war, zum einen die Integration einzelner Komponenten und das Zusammenspiel mit der Kommunikationseinheit zu erproben, zum anderen das Testen der Algorithmik selbst. Zu diesem Zweck wurde ein spezieller Datengenerator entwickelt, der basierend auf Fahrzeug- und LSA-Protokollen der Mikrosimulation VISSIM in der Lage ist, Nachrichten im gleichen Format zu erzeugen, wie diese später von realen Fahrzeugen versendet werden sollen. Hierzu wur-

de der reale Knotenpunkt in VISSIM so modelliert, dass eine möglichst genaue Übereinstimmung der virtuellen Kreuzung mit den geografischen Informationen des Knotenpunkts aus der LDM erzielt wurde. Die Bilder 5 und 6 zeigen eine Fotografie des Knotenpunkts Hamburger Straße/Gerichtsstraße in der Stadt Dortmund und den Lageplan der Kreuzung. Es handelte sich hierbei um einen festzeitgesteuerten Knotenpunkt mit einer zweistreifigen Hauptfahrbahn und einer einstreifigen kreuzenden Nebenstraße.

Neben dem Datengenerator wurde noch eine grafische Oberfläche implementiert, die den Knotenpunkt und die berechneten Trajektorien visualisiert. Dadurch war ein Erkennen von groben Berechnungsfehlern oder auch Konfigurationsfehlern möglich. Die Bilder 7 und 8 zeigen links die in VISSIM modellierte Kreuzung und rechts die Visualisierung der Trajektorien. Zur Auswertung der Ergebnisse verfügt die Anwendung IRIS über die Möglichkeit, Resultate der Berechnungen an bestimmten Stellen des Prozesses zu protokollieren. Für die Analyse der Funktionalität des Verfahrens zur Abschätzung des Manövers

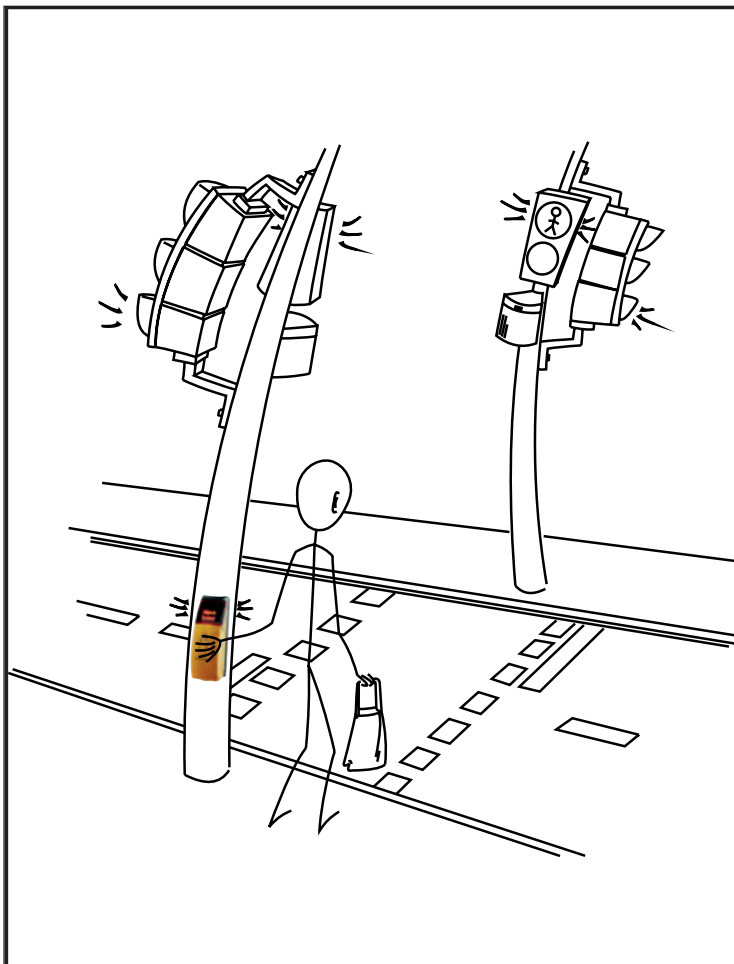
wurde die Haltlinie als Bezugspunkt gewählt. Es wurde davon ausgegangen, dass diese der finale Entscheidungspunkt des Fahrers in Bezug auf sein Manöver ist. Das Manöver sollte korrekt vorausgesehen werden, bevor das Fahrzeug in den eigentlichen Kreuzungsbereich einfährt. Hierzu war es notwendig zu wissen, zu welchem Zeitpunkt bzw. an welcher Position vor dem Bezugspunkt das Fahrzeug einem bestimmten Reference Track zugeordnet wurde. Da der Blinker bei der Abschätzung des Manövers einen menschlichen Einflussfaktor darstellt, wurde das Verfahren mit unterschiedlichen Gewichtungen des Blinkers getestet:

- (1) kein Einfluss
 $f_i^b(b_i \triangle \text{links v rechts v aus}) = 1,0$
- (2) geringer Einfluss
 $f_i^b(b_i \triangle \text{links v rechts}) = 2,0$ und $f_i^b(b_i \triangle \text{aus}) = 1,0$
- (3) hoher Einfluss
 $f_i^b(b_i \triangle \text{links v rechts}) = 4,0$ und $f_i^b(b_i \triangle \text{aus}) = 2,0$

Zunächst wurde das Verhalten des Verfahrens beim Heranfahren eines Fahrzeugs aus der Gerichtsstraße (im Bild 9 von oben

kommend) untersucht. Das Bild 9 zeigt die möglichen Fahrbeziehungen, die dem Fahrer zur Auswahl stehen. Entweder er kreuzt, dann wird er dem RT 6111 zugeordnet, oder er biegt rechts ein, dann wird er dem RT 6113 (rechter Fahrstreifen) und dem RT 6112 (linker Fahrstreifen) zugewiesen. Wenn der Fahrer links einbiegt, erfolgt eine Zuordnung zum RT 6109 (linker Fahrstreifen) und dem RT 6110 (rechter Fahrstreifen). Ein Wenden wird in dem Verfahren nicht als mögliches Manöver berücksichtigt.

Bild 10 zeigt die Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Möglichkeiten zur Zuordnung eines kreuzenden Fahrzeugs zu den Reference Tracks. Es ist zu erkennen, dass in der Zufahrt zur Haltlinie (im Bild grün dargestellt) das Fahrzeug jedem Reference Track mit der gleichen Wahrscheinlichkeit von 0,2 zugeordnet wird. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass alle RTs in der Zufahrt übereinander auf dem gleichen Fahrstreifen liegen. Erst kurz vor Erreichen der Haltlinie führen die geometrische Wahrscheinlichkeitsermittlung und die Einbeziehung des Richtungsvektors zu unterschiedlichen Gewichtungen. Dem ge-



Geschätzte

31.297.641

Fußgänger drücken uns täglich.

Taster „Berlin“

Seit 1997 haben sich Taster von RTB zum Qualitätsstandard an Lichtzeitanlagen entwickelt. Mit ausgezeichnetem Design, wahlweise Sensorfläche oder Mechanik und für alle Spannungsvarianten.

Danke, dass Sie uns wertschätzen.



RTB GmbH & Co. KG | Tel. 05252 9706-0 | www.rtb-bl.de

Bild 9: Mögliche Fahrbeziehungen aus der Gerichtsstraße kommend

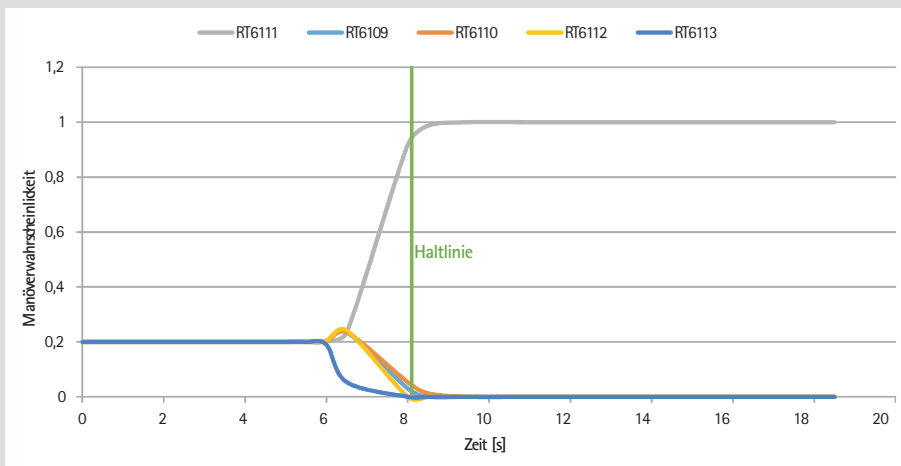
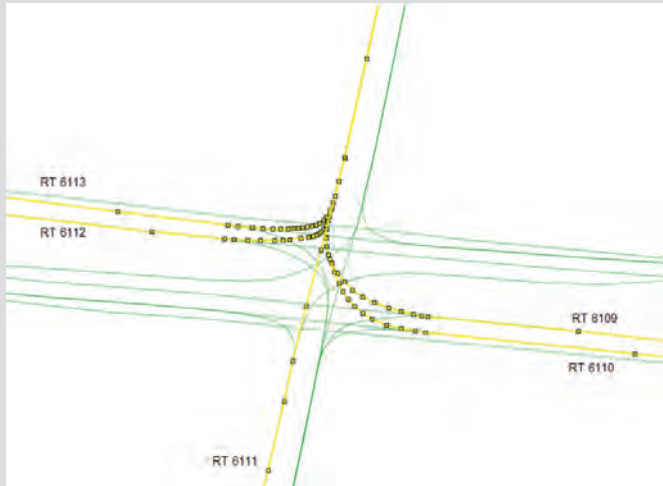


Bild 10: Manöverwahrscheinlichkeiten bei kreuzendem Fahrzeug ohne Blinkergewichtung

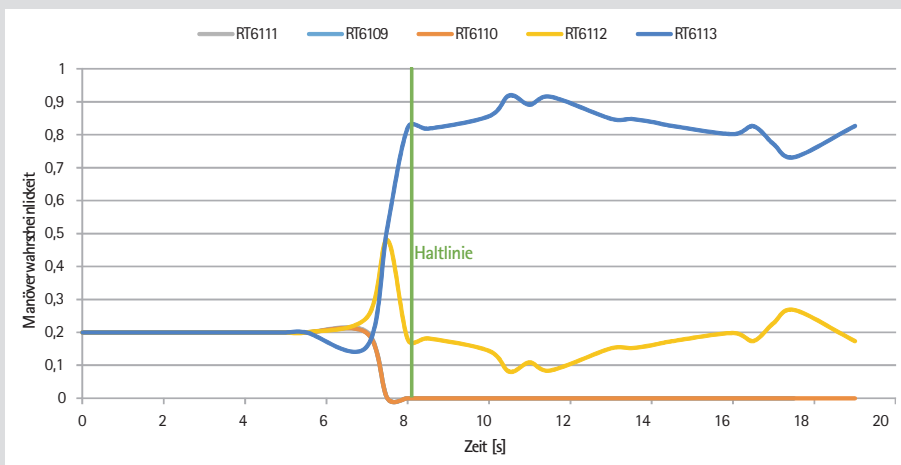


Bild 11: Manöverwahrscheinlichkeiten bei rechtseinbiegendem Fahrzeug ohne Blinkergewichtung

radeaus führenden RT 6111 (graue Linie) wird dann relativ rasch eine hohe Wahrscheinlichkeit zugewiesen. Sobald die Haltlinie gekreuzt ist, erreicht diese auch einen Wert von 1,0. Wird dem Blinker ein hoher Einfluss zugeschrieben, so ergibt sich schon vor der Haltlinie eine Wahrscheinlichkeit von 0,33 für die Geradeausfahrt (ohne Abbildung).

Zur weiteren Untersuchung wurde im Folgenden das Rechteinbiegen auf den linken der beiden Fahrstreifen der Hauptstraße betrachtet. Bild 11 stellt das Ergebnis der Berechnungen ohne Einbeziehung des Blinkers dar. Es ist deutlich die Gleichverteilung der Wahrscheinlichkeiten auf die Reference Tracks vor Erreichen der Haltlinie zu erkennen. Sobald das Fahr-

zeug die Haltlinie gekreuzt hat, werden die Wahrscheinlichkeiten der geradeaus und links wegführenden RTs reduziert und den rechtseinbiegenden RTs höhere Wahrscheinlichkeiten zugewiesen. Wie die Grafik in Bild 11 veranschaulicht, kann keine Zuordnung zu 100 % auf einen der beiden rechtseinbiegenden RTs erfolgen. Wohl aber wird dem RT 6113 (blaue Linie) eine höhere Wahrscheinlichkeit zugeteilt als dem RT 6112 (gelbe Linie). Dies entspricht auch der Situation, wie sie in VISSIM nachgestellt wurde. Die Schwankungen in der Wahrscheinlichkeit sind durch die Standardabweichung der Positionierung, die hier mit 0,7 m angenommen wurde, zu erklären.

Die Bilder 12 und 13 zeigen die ermittelten Wahrscheinlichkeiten bei einer geringen bzw. hohen Blinkergewichtung. Die errechneten Wahrscheinlichkeiten für RT 6109, RT 6110 und RT 6111 im Zulauf zur Haltlinie werden wesentlich niedriger angesetzt. Bei einer hohen Blinkergewichtung verstärkt sich dieser Effekt noch (Bild 13). Auch in diesem Fall wird nach dem Queren der Haltlinie dem RT 6113 die größte Wahrscheinlichkeit zugeteilt. Die Schwankungen erklären sich wiederum durch die Varianzen in der Positionsbestimmung des Fahrzeugs.

Die Auswertung zeigt, dass die Einbeziehung des Blinkers bei einer einstreifigen Zufahrt auf einen LSA-gesteuerten Knotenpunkt ein wichtiges Merkmal für die Abschätzung der Manöverwahrscheinlichkeit ist. Des Weiteren konnte die Funktionalität des Algorithmus in Bezug auf eine fahrfstreifenfeine Zuordnung des Fahrzeugs bei einer Standardabweichung von 0,7 m bei der Positionsermittlung des Fahrzeugs nachgewiesen werden. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass es durchaus sinnvoll wäre, zusätzliche Attribute in die Berechnung der Wahrscheinlichkeit aufzunehmen. Zu nennen sei hier stellvertretend die Reduzierung der Geschwindigkeit beim Einbiegen auf die Hauptfahrbahn.

6 Feldversuch

Neben den Versuchen in der virtuellen Umgebung wurde das Verfahren auch am realen Knotenpunkt in Dortmund getestet. Die Kreuzung wurde mit der entsprechenden Infrastruktur ausgestattet, wie in Bild 14 dargestellt. Ein Laserscanner sorgte für die Detektion von Fußgängern und Fahrradfahrern. Im Schaltschrank des Steuer-

geräts der LSA waren zudem ein Laptop untergebracht zur Steuerung, Konfiguration und Aktivierung der Anwendung und ein GPS-Receiver, um Fahrzeugsystem und straßenseitiges System zeitlich zu synchronisieren. Des Weiteren nimmt ein Rechner die Daten des Laserscanners entgegen und eine Schnittstelle zum Steuergerät greift die aktuellen und zukünftigen Schaltzustände ab. An der Peitsche eines Signalgebermastes war der Hauptrechner angebracht. Dieser enthielt die Kommunikationseinheit, die LDM und die Anwendung zur Prognose und Situationserkennung IRIS. Zudem trug die Peitsche auch noch die Antennen zur Datenübertragung. Für die Versuche standen insgesamt drei unterschiedliche Pkw zur Verfügung [8], die jeweils von professionellen Fahrern gelenkt wurden. Alle Test-Pkw waren mit einem GPS-Receiver und einem zusätzlichen Rechner ausgestattet zur Verbesserung der Positionierung. Details hierzu sind in [9] zu finden. Des Weiteren verfügten die Fahrzeuge über eine Kommunikationseinheit und ein prototypisches Display zur Visualisierung der Warnungen. Die visuellen Effekte wurden zusätzlich von akustischen Signalen begleitet. Haptische Elemente der Mensch-Maschine-Interaktion wurden nicht genutzt.

Getestet wurden die Szenarien (1) Missachtung der LSA bei ROT, (2) Rechtsabbiegen mit Konflikt Fußgänger oder Radfahrer und (3) bedingt verträgliches Linksabbiegen. Die Fahrer der Versuchs-Pkw mussten entlang vorgeschriebener Routen fahren und ein „Drehbuch“ mit entsprechenden Anweisungen absolvieren. In jedem Pkw saß neben dem Fahrer auch noch ein Beifahrer, der die Aufgabe hatte, die korrekte Anzeige der Warnung zu dokumentieren. Da aus technischen Gründen kein automatisches Mitprotokollieren der Warnungsanzeige im Fahrzeug möglich war, musste der Beifahrer die Anzeige der Warnung per Funk an den Versuchsleitstand, welcher neben dem Steuergerät eingerichtet wurde, melden. An der Strecke war eine weitere Person positioniert, um die Entfernung des Fahrzeugs vom potenziellen Konfliktpunkt abzuschätzen. Dieses Abschätzen wurde durch das Anbringen von Wegmarken am Straßenrand ermöglicht. Da die Versuche im öffentlichen Straßenraum stattfanden und jeder Personen- und Sachschaden zu vermeiden war, wurden die Fahrer angewiesen, auch bei Ausbleiben einer Warnung entsprechend zu reagieren. Des Weiteren wurde die Haltlinie durch eine virtuelle Haltlinie ersetzt,

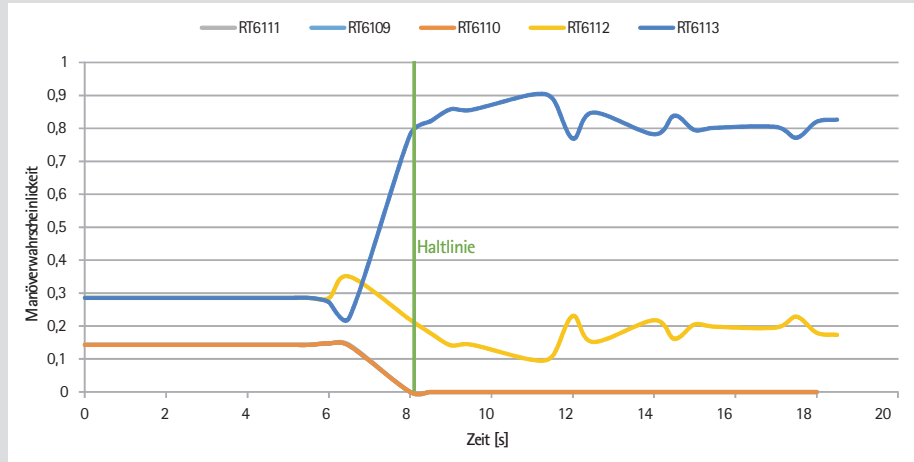


Bild 12: Manöverwahrscheinlichkeiten bei rechtseinbiegendem Fahrzeug mit geringer Blinkergewichtung

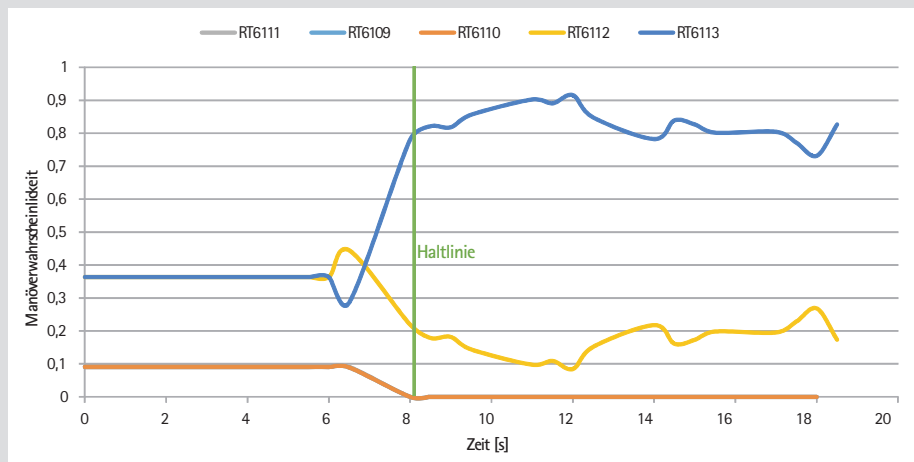


Bild 13: Manöverwahrscheinlichkeiten bei rechtseinbiegendem Fahrzeug mit hoher Blinkergewichtung

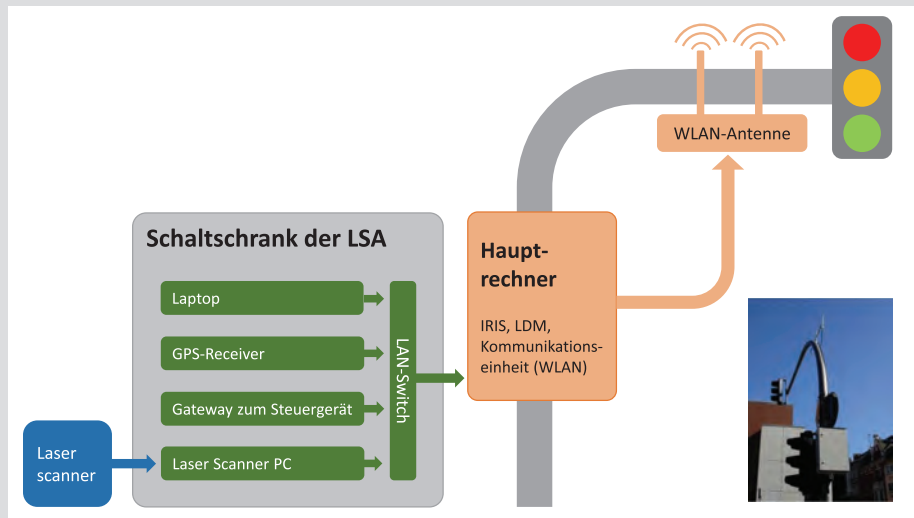
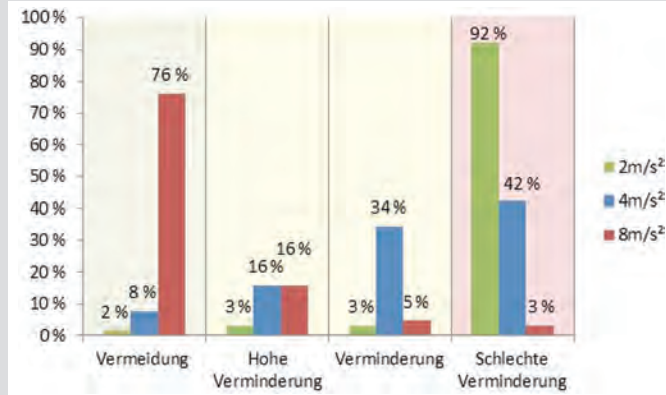


Bild 14: Technische Ausstattung der Infrastruktur an der Kreuzung

die einige Meter vor der realen Haltlinie lag [10]. Insgesamt wurden 124 Versuche mit den Sub-Systemen im Fahrzeug und auf der Straßenseite durchgeführt. In 114 Fällen hat die Anwendung IRIS korrekt gearbeitet und die Situation analysiert. In 10 Fällen

traten Probleme mit der Verbindung zum Steuergerät auf oder die Anwendung musste neu gestartet werden. Da es sich um ein prototypisches System handelte und viele Komponenten aufeinander abgestimmt werden mussten, jedoch an anderen Stellen weitere Probleme auftraten,

Bild 15: Reduzierte kinetische Energie in den Feldversuchen



so z. B. bei der Darstellung der Warnung im Fahrzeug, konnten nur 68 Versuche erfolgreich durchgeführt werden.

Wie schon erwähnt, waren die Fahrer angewiesen, keine Risiken einzugehen, daher wurde auf Basis des Zeitpunkts, an dem die Warnung erhalten wurde, und der Position des Fahrzeugs ein theoretischer Wert ermittelt. Dieser Wert entspricht der kinetischen Energie, welche durch ein entsprechendes Abbremsverhalten abgebaut werden konnte. Die abgebaute Energie wurde in vier Kategorien eingeteilt. Ein Abbau der kinetischen Energie zu 100 % entspricht einer Vermeidung der Kollision. Von einer hohen Verminderung der Aufprallenergie wird gesprochen, wenn mindestens 75 % der kinetischen Energie im Vorfeld abgebaut werden konnten. Bei mindestens 50 % wird von einer leichten Verminderung ausgegangen. Von einer sehr schlechten bis keiner Verminderung wird bei allen Fällen gesprochen, in denen weniger als 50 % der kinetischen Energie abgebaut wurde.

Bei der Auswertung wurde zwischen sanftem Bremsen (2 m/s²), normalem Bremsen (4 m/s²) und scharfem Bremsen (8 m/s²) unterschieden. Wie das Bild 15 zeigt, führte das sanfte Bremsen nur in 2 % aller Fälle zu einer Vermeidung der Kollision. In 8 % aller Fälle konnte mit einem normalen Bremsverhalten die Kollision vermieden werden und in 76 % aller Fälle konnte mit einem scharfen Bremsmanöver ein Unfall ganz verhindert werden (der ohne das IRIS-System unweigerlich stattgefunden hätte).

7 Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Beitrag wurde das Verfahren IRIS zur Abschätzung und Vorausberechnung von Trajektorien und Identifikation verkehrskritischer Situationen an einer städtischen Kreuzung vorgestellt. Das Verfahren hat als algorithmischer Kern des Applikations-Prototyps IRIS seine Tauglichkeit sowohl in Simulationsumgebungen als auch an einer realen Kreuzung unter Beweis gestellt. Obwohl in der ersten Version des Verfahrens noch nicht alle prinzipiell verfügbaren Informationen ausgewertet und berücksichtigt wurden, zeigten die Ergebnisse, dass das System einen signifikanten Beitrag dazu leisten kann, Unfälle im Kreuzungsbereich abzumildern oder ganz zu vermeiden. Dies ist von besonderer Bedeutung für Fußgänger und Radfahrer, die ungeschützt oft schwere Verletzungen bei Unfällen davontragen. Zukünftige Forschungen und Untersuchungen werden sich darauf konzentrieren, (1) weitere Informationen auszuwerten, um eindeutigere Manöverwahrscheinlichkeiten zu erhalten, (2) verbesserte und präzisere Detektionsmöglichkeiten zu nutzen und (3) Stabilität und Verfügbarkeit des Systems zu verbessern.

Neben einer rein technischen Betrachtung ist aber von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Einführung derartiger kooperativer Systeme im städtischen Bereich die Zusammenarbeit und organisatorische Regelung von Infrastrukturanbietern, -betreibern und der Automobilindustrie. Das im Aufbau befindliche euro-

päische Vorhaben des Eurokorridors Rotterdam-Wien zeigt im Autobahnbereich den Weg bereits auf.

8 Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde finanziert von der Europäischen Union im Rahmen des Projekts SAFESPOT. Ein spezieller Dank geht an dieser Stelle auch an das Team, das bei der Durchführung der Feldversuche mitgewirkt hat.

Literaturverzeichnis

- [1] Webauftritt UR:BAN. www.urban-online.org [28. Mai 2014].
- [2] Statistisches Bundesamt. <https://www.destatis.de> [23. Juli 2012].
- [3] Schreiber, M.; Ortlepp, J.; Butterwegge, P. (2014). „Abbiegeunfälle zwischen Kraftfahrzeugen und Radfahrern“. In: *Straßenverkehrstechnik* 5/2014, Seiten 303–310.
- [4] Schendzielorz, T. (2010). Vortrag Demonstration „Sichere Kreuzung“, Dortmund 25. Februar 2010.
- [5] Romero, L. J. (2014). Vortrag „On the Road Again“, 6th ETSI ITS Workshop, Berlin, 12.–13. Februar 2014.
- [6] Papp, Z.; Brown, C.; Bartels, C. (2008). „World modelling for cooperative intelligent vehicles“ in den Veröffentlichungen des IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV 2008); Eindhoven, 1050–1055.
- [7] Alhajyaseen, W. K. M. et al. (2011). „Analysis on the Variation of Left-turning Vehicle Spatial Trajectories Inside Intersections“. In: *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Ausgabe 9, 1543–1557.
- [8] Pu, H.; Schendzielorz, T.; Lotz, A.; Mathias, P.; Belhoula, K. (2010). „Cooperative C2X Applications in Intersection Area on Example of the SAFESPOT Project“. In: *AmE 2010 – Automotive meets Electronics – GMM-Fachtagung*, VDE Verlag.
- [9] Schubert, R.; Schlingelhof, M.; Cramer, H.; Wanielik, G. (2007). „Accurate Positioning for Vehicular Safety Applications – the SAFESPOT Approach“. In: *IEEE (Hg.): 65th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2007)*. Dublin, Ireland, April 22–25, 2007: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1550–2252.
- [10] Schendzielorz, T. et al. (2010). D5.6.2 Evaluation on Urban Roads IP Deliverable, Brussels.

Besuchen Sie uns im Internet unter
www.straßenverkehrstechnik-online.de
www.kirschbaum.de

Straßen-
verkehrstechnik