

Fahrerverhaltensuntersuchungen und Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für die Kreuzungsassistenz

[Driver Behaviour Studies and Human-Machine-Interaction Concepts for Intersection Assistance]

Dipl.-Ing. **Felix Klanner**, Dipl.-Inf. **Stephan Thoma**,
BMW Group Forschung und Technik, München

Prof. Dr. rer. nat. **Hermann Winner**, Fachgebiet Fahrzeugtechnik,
TU Darmstadt, Darmstadt

Keywords:

Active Safety, Human-Machine-Interaction, Driving Behaviour, Intersection Observation

Kurzfassung

Die Unfallstatistik weist den Kreuzungsbereich als einen Unfallschwerpunkt aus. Die Hauptunfallursachen sind Unaufmerksamkeit, Fehleinschätzung und Sichtbehinderung. Zur Vermeidung von potenziellen Kollisionen im Kreuzungsbereich wird ein kommunikationsbasierter Querverkehrsassistent (KQA) mit dem Schwerpunkt Einbiegen/Kreuzen „ohne Stopp an der Haltelinie“ vorgestellt. Für diesen Querverkehrsassistenten werden zwei Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte vorgestellt und evaluiert. Für dessen Erweiterung auf das Einbiegen/Kreuzen „mit Stopp an der Haltelinie“ sowie das Linksabbiegen wird eine Methode zur Fahrerverhaltensanalyse an einer realen Kreuzung entwickelt. Diese baut auf einer Videobeobachtung des Kreuzungsgeschehens auf und ermöglicht die Bestimmung der im realen Straßenverkehr gefahrenen Zeitlücken zwischen dem wartepflichtigen und vorfahrtsberechtigten Fahrzeug beim Einbiegen/Kreuzen und Linksabbiegen.

Abstract

Intersections are accident hotspots and the main causes are inattentiveness, misinterpretations and line of sight obstructions. To prevent potential collisions at intersections, a communication-based assistant for turning into and crossing intersections has been developed. Currently, the focus of this assistance system is the turning/crossing “without stopping at the stop line” scenario. Two different human-machine-interaction (HMI) concepts are introduced and evaluated. To enhance the functionality of the communication-based turning/crossing assistant for the scenarios “with stopping at the stop line” and turning left, a method to analyse driving behaviour at real intersections has been developed. This method is based on video observation of the intersection. It identifies time gaps between vehicles on main and side road when turning into/crossing an intersection or when turning left.

1. Einleitung	3
2. Kreuzungsassistenz am Beispiel der Querverkehrsassistenz.....	4
2.1. Stand der Technik.....	4
2.2. Grundkonzept des entwickelten kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten (KQA).....	5
2.3. Einfluss unscharfer Positionsdaten auf den potenziellen Kollisionsbereich	6
3. Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für den KQA	7
3.1. Warnstrategien für den KQA.....	7
3.2. Evaluierung der Grundakzeptanz der Assistenz und Ableitung der favorisierten Assistenzstrategie.....	9
3.3. Evaluierung der Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung.....	11
4. Fahrerverhaltensuntersuchung zur Erweiterung der Kreuzungsassistenz.....	14
4.1. Technische Umsetzung der Methode	14
4.2. Erste Ergebnisse	16
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	18
6. Literatur	20

1. Einleitung

Die Untersuchung des Unfallgeschehens weist insbesondere Kreuzungen als einen wesentlichen Unfallschwerpunkt aus. So ereigneten sich 2006 in Deutschland 36% aller Unfälle mit Personenschaden an Kreuzungen. 63% davon waren Unfälle mit querendem Verkehr beim Einbiegen/Kreuzen und 15% mit Gegenverkehr beim Linksabbiegen. [1]

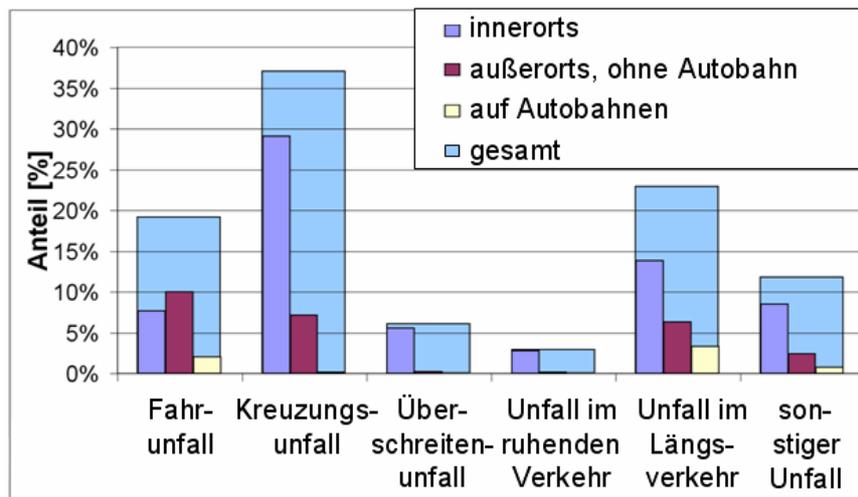


Abbildung 1: Unfälle mit Personenschaden in Deutschland 2006 [1].

Bei der Annäherung an eine Kreuzung wirken viele Informationen auf den Fahrer des wartepflichtigen Fahrzeugs ein. Auf Grundlage dieser Informationen entscheidet der Fahrer, wann er die Kreuzung passieren kann. Zu einer kritischen Situation, d.h. einer Situation mit hoher Kollisionsgefahr, kommt es, wenn der Fahrer nicht mehr in der Lage ist, Teile des Informationsverarbeitungsprozesses korrekt durchzuführen. Um dies zu vermeiden besteht die Möglichkeit, den Fahrer durch ein vorausschauendes Kreuzungsassistenzsystem sowohl bei der Interpretation des Kreuzungsgeschehens als auch bei der Vermeidung potenzieller Kollisionen zu unterstützen. Wichtige Teilsysteme dieses Assistenzsystems zur Erhöhung der Kreuzungssicherheit sind der Querverkehrsassistent und Linksabbiegeassistent. Der Querverkehrsassistent bezieht sich auf das Einbiegen/Kreuzen, der Linksabbiegeassistent auf das Linksabbiegen.

Abhängig von der Kreuzungsgeometrie, der Verkehrsregelung und dem Verkehrsaufkommen gibt es eine große Bandbreite potenziell kritischer Kreuzungssituationen. Grundsätzlich lassen sich diese in zwei Situationen unterteilen: Kreuzungsdurchfahrt des wartepflichtigen Fahrzeugs „ohne Stopp an der Haltelinie“ und „mit Stopp an der Haltelinie“. Unter „mit Stopp an der Haltelinie“ wird hierbei verstanden, dass das Fahrzeug an der Haltelinie zum Stehen gebracht wird oder diese mit niedriger Geschwindigkeit (kleiner 10 km/h) überfahren wird.

Zunächst wird die Kreuzungsassistenz am Beispiel der Querverkehrsassistenz beschrieben. Der Schwerpunkt liegt auf der Situation „ohne Stopp an der Haltelinie“. Für diesen Querverkehrsassistenten werden anschließend zwei Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte vorge-

stellt und evaluiert. Die Entwicklung dieses Querverkehrsassistenzsystems erfolgt im Rahmen des nationalen Förderprojektes AKTIV (Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr). In einem abschließenden Kapitel wird eine Fahrerhaltensuntersuchung als Grundlage für die Erweiterung der Kreuzungsassistenz auf das Einbiegen/Kreuzen „mit Stopp an der Haltelinie“ sowie das Linksabbiegen dargestellt. Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf der Bestimmung der an einer realen Kreuzung minimal gefahrenen Zeitlücken zwischen dem wartepflichtigen und vorfahrtsberechtigten Fahrzeug. Die Zeitlücke wird über eine Zeitmessung bestimmt, die startet, wenn das erste Fahrzeug den Kreuzungsbereich gerade verlässt und die stoppt, wenn das zweite Fahrzeug in den Kreuzungsbereich einfährt. Hierbei wird nur der Kreuzungsbereich betrachtet, den beide Fahrzeuge passieren. Diese Zeitlückenbestimmung ist erforderlich, um das System so auszulegen, dass die Entscheidung des Systems, eine Warnung auszugeben, in möglichst vielen Fällen von den Fahrern akzeptiert wird. D.h. dass auch aus Sicht des Fahrers ein zu geringer Zeitabstand zum vorfahrtsberechtigten Verkehr vorlag, um ein sicheres Einbiegen/Kreuzen bzw. Linksabbiegen zu ermöglichen. Erste Ergebnisse und die umgesetzte Methode werden erläutert.

2. Kreuzungsassistenz am Beispiel der Querverkehrsassistenz

2.1. Stand der Technik

In der Literatur sind bereits verschiedene prototypisch realisierte Querverkehrsassistenzsysteme vorgestellt worden. Bei diesen Assistenzsystemen wird zwischen Intelligenz des Assistenzsystems in der Infrastruktur (z.B. Intersection Decision Support [3]) und Intelligenz im Fahrzeug (z.B. Cooperative collision warning systems [13]) unterschieden.

Die Aufgabe der Querverkehrsassistenzsysteme besteht darin, den wartepflichtigen Fahrer beim sicheren Einbiegen/Kreuzen zu unterstützen und damit potenziell kritische Kreuzungssituationen zu entschärfen. Grundlage hierfür stellt die Erkennung potenzieller Kollisionen zwischen dem wartepflichtigen und vorfahrtsberechtigten Fahrzeug dar. Diese Erkennung erfolgt in bereits prototypisch entwickelten Querverkehrsassistenzsystemen auf Basis der Positionen und Bewegungszustände der Fahrzeuge im Kreuzungsbereich. Am Fahrzeug angebrachte Umfelderfassungssensoren wie Radar oder Lidar erfassen diese Informationen. Diese werden im Folgenden als fahrzeugautarke Sensoren bezeichnet. Gerade in der frühen Phase der Kreuzungsannäherung reicht diese Form der Informationsbeschaffung auf Grund zu geringer Reichweiten und Erfassungsbereichabschattung häufig nicht aus. Eine Erweiterung zur Detektion anderer Verkehrsteilnehmer stellt der Datenaustausch mittels Kommunikationssystemen zwischen Fahrzeugen untereinander bzw. mit der Infrastruktur dar. Ein besonderer Vorteil dieser Technologie gegenüber fahrzeugautarken Umfelderfassungssensoren besteht in der Möglichkeit, direkt gemessene Daten (z.B. Gierrate) zu übermitteln und Strecken von mehreren hundert Metern zu überbrücken.

Bestandteile der über das Kommunikationssystem zu übertragenden Informationen sind die Positions- und Bewegungsdaten der Fahrzeuge sowie ein globaler Zeitstempel. Durch Fehlerquellen bei der Positionsbestimmung, in der Kommunikation und auf Grund des instationären Fahrerhaltens bei der Kreuzungsannäherung sind diese Daten mit zeitlich veränderli-

chen Unschärfen behaftet. Diese Datenunschärfen bedeuten für das Assistenzsystem eine Unsicherheit über die tatsächlichen Fahrzeugpositionen.

Bisher prototypisch realisierte Querverkehrsassistenzsysteme beschränken sich darauf, die grundsätzliche Machbarkeit verschiedener Technologiekonzepte aufzuzeigen. Aspekte wie der Umgang mit unscharfen Daten wurden nur am Rande betrachtet und ein Funktionsnachweis der Querverkehrsassistenz in realen kritischen Kreuzungssituationen noch nicht erbracht.

2.2. Grundkonzept des entwickelten kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten (KQA)

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, basiert das Grundkonzept des KQA auf drei Teilsystemen:

- System zur Generierung von Positions- und Fahrdynamikdaten (FD-Daten)
- Kommunikationssystem
- Assistenzsystem

Die Eingangsgrößen in das Assistenzsystem im Eigenfahrzeug (wartepflichtiges Fahrzeug) sind die Positions- und Fahrdynamikdaten des Eigenfahrzeugs und der Fremdfahrzeuge. Die Informationen der Fahrzeuge werden über ein Kommunikationssystem übertragen. Die Funktion des Assistenzsystems im Eigenfahrzeug ist unabhängig davon, ob in den Fremdfahrzeugen Assistenzsysteme integriert sind oder nicht. Die Systeme zur Generierung der Positions- und Fahrdynamikdaten sind aber in allen relevanten Fahrzeugen erforderlich.

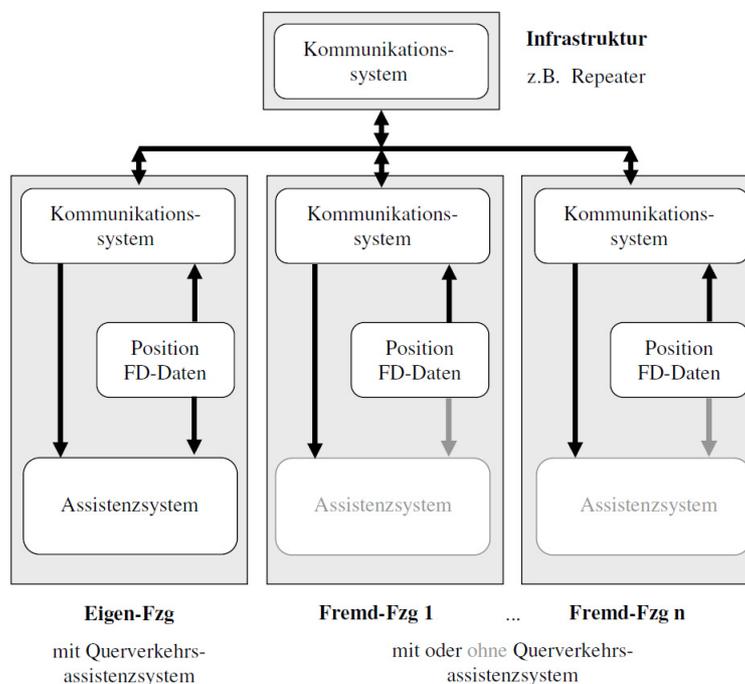


Abbildung 2: Grundkonzept des KQA

Grundsätzlich erfolgt die Übertragung der Daten direkt zwischen den Fahrzeugen. Sollte aber wegen einer für die Kommunikation unüberwindlichen Sichtbehinderung keine direkte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen möglich sein, kann entweder ein anderes Fahr-

zeug oder eine Kommunikationseinheit in der Infrastruktur als Wiederholer („Repeater“) fungieren. Die Aufgabe des Repeaters besteht darin, die von den Fahrzeugen ausgesendete Information zu empfangen und nochmals auszusenden. Eine Positionierung des Repeaters in der Kreuzungsmitte bringt den Vorteil, dass die Information in alle Kreuzungsarme verbreitet wird und damit die Möglichkeit besteht, Sichtbehinderungen zwischen den Fahrzeugen zu umgehen.

2.3. Einfluss unscharfer Positionsdaten auf den potenziellen Kollisionsbereich

Die Fahrzeugposition umfasst die Positionskordinaten in einem globalen Bezugssystem sowie die Ausrichtung gegenüber Nord. Auf Grundlage der bestimmten Fahrzeugpositionen und -ausrichtungen wird im KQA für jedes Fahrzeug die voraussichtlich zukünftig befahrene Trajektorie prädiziert und der Schnittpunkt der Trajektorien (SP) berechnet. Dieser Schnittpunkt ist der theoretische Kollisionspunkt, wenn die Fahrzeuge als Punkte angenommen werden und die Fahrzeugpositionen exakt bekannt sind. Unter Berücksichtigung der Fahrzeuglänge und -breite ergibt sich anstelle dieses Kollisionspunktes ein Kollisionsbereich, der so genannte kritische Bereich (siehe Abbildung 3).

Befinden sich die Mittelpunkte des vorfahrtsberechtigten (Fremd-Fzg) und des wartepflichtigen Fahrzeugs (Eigen-Fzg) gleichzeitig innerhalb dieses Bereiches, ereignet sich eine Kollision.

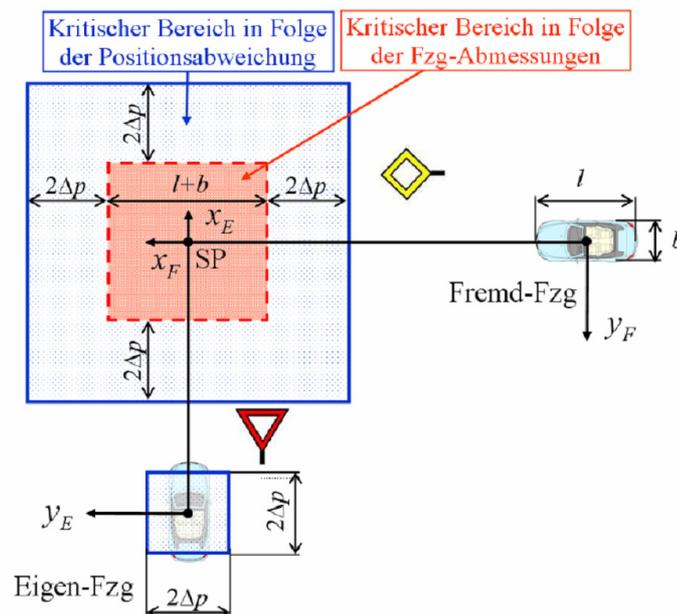


Abbildung 3: Der kritische Bereich ergibt sich aus den Fahrzeugabmessungen (l: Länge, b: Breite) und den messfehlerbedingten Positionsabweichungen (für beide Fahrzeuge mit Δp in die jeweilige x- und y-Richtungen als gleich groß definiert).

Grundlage für die Bestimmung der Fahrzeugpositionen ist das Global Positioning System (GPS). Die GPS-Positionsbestimmung ist jedoch mit schwankenden Abweichungen behaftet [10]. Zusätzlich wird die Fahrzeugposition durch eine unbekannte Fahrzustandsänderung des Fremdfahrzeugs während der Latenzzeiten bei der Datenübertragung zwischen dem Fremd- und Eigenfahrzeugen verfälscht. Bei der Kollisionsbetrachtung wird dies durch eine

Vergrößerung des kritischen Bereichs um diese Positionsabweichungen Δp berücksichtigt. Ebenfalls ist es erforderlich, die schwankende Abweichung der GPS-Position bei der Wahl der Assistenzstrategie und deren Auslegung zu berücksichtigen.

3. Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für den KQA

Um den wartepflichtigen Fahrer beim sicheren Einbiegen/Kreuzen zu unterstützen sind im KQA drei Assistenzstufen vorgesehen:

- Information über die Verkehrsregelung
- Warnung vor einer potenziellen Kollision mit dem Querverkehr auf Grund einer Vorfahrtsmissachtung
- Aktive, durch KQA ausgelöste Vollverzögerung (übersteuerbar durch Fahrer), falls der wartepflichtige Fahrer auf die Warnung nicht reagiert

Die Information über die Verkehrsregelung erfolgt ab rund 150 m vor der Kreuzung. Eine Warnung erfolgt, wenn der wartepflichtige Fahrer voraussichtlich eine Vorfahrtsmissachtung begehen wird und die daraus resultierende potenziell kritische Kreuzungssituation offensichtlich nicht erkennt.

Unsicherheiten in der Positionsbestimmung haben Schwankungen im Assistenzzeitpunkt (vor allem bei Warnung und aktiver Vollverzögerung) zur Folge. Es wird davon ausgegangen, dass insbesondere eine zu frühe Vollverzögerung beim Fahrer auf starke Ablehnung stößt. Denn dadurch kommt das Fahrzeug deutlich zu weit von der Haltelinie entfernt zum Stehen. Bei einem Warnsystem hingegen kann der Fahrer selbst entscheiden, wie stark er verzögert und damit Schwankungen im Warnzeitpunkt ausgleichen. Um ein kollisionsvermeidendes System wie den KQA als Warnsystem in künftigen Fahrzeugen zu implementieren, sind deshalb zwei grundlegende Nachweise notwendig:

- **Nachweis der Grundakzeptanz** der Assistenz in einem realen kritischen Kreuzungsszenario. Dazu wird eine Untersuchung durchgeführt, die unter Berücksichtigung der technisch bedingten Positionsunschärfe die von den meisten Fahrern akzeptierten Warnzeitpunkte ermittelt. Gleichzeitig erfolgt die Auswahl einer favorisierten Assistenzstrategie.
- **Nachweis der Wirksamkeit** zur Unfallvermeidung in einem realen kritischen Kreuzungsszenario. In einem Probandenversuch wird die korrekte Interpretation und erfolgreiche Reaktion in einer überraschend auftretenden Gefahrensituation im Kreuzungsbereich überprüft und einer „Baseline“-Messung ohne Warnsystem gegenüber gestellt.

Im Folgenden werden die zwei implementierten Warnstrategien des KQA, das Vorgehen zum Nachweis der Grundakzeptanz sowie der Wirksamkeit und ausgewählte Untersuchungsergebnisse dargestellt.

3.1. Warnstrategien für den KQA

Im KQA sind zwei verschiedene Warnstrategien (siehe Abbildung 4) umgesetzt, die bei der Evaluierung von Versuchspersonen beurteilt wurden:

a) Visuell-haptische Warnung mit Rampe

Bei dieser Assistenzstrategie erhält der Fahrer zunächst eine haptische Warnung durch eine rampenförmig ansteigende Verzögerung. Diese steigt während 1 s auf $1,5 \text{ m/s}^2$ an und bleibt danach für 1 s konstant. Ab Beginn der konstanten Verzögerung erfolgt zusätzlich eine visuelle Warnung durch eine Anzeige im Head-Up Display.

b) Visuell-auditiv-haptische Warnung

Bei dieser Assistenzstrategie erhält der Fahrer gleichzeitig eine visuelle Warnung durch eine Anzeige in Head-Up Display und Instrumenten-Kombi, einen Warnton sowie eine haptische Anbremsung. Die haptische Anbremsung steigt sprunghaft an und beträgt rund 3 m/s^2 . Diese Verzögerung bleibt während der angenommenen Reaktionszeit von 1 s bestehen.

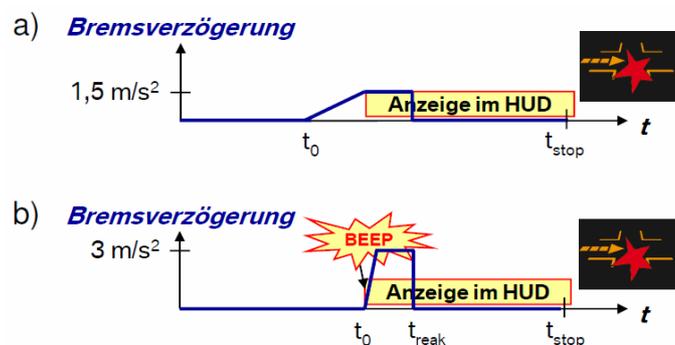


Abbildung 4: Evaluierte Assistenzstrategien.

Die Aufmerksamkeit des Fahrers soll insbesondere durch die haptische Anbremsung und die Akustik geweckt werden. Die Darstellung im Head-Up Display und Instrumenten-Kombi dient in erster Linie dazu, die Warnung bildlich zu erklären (siehe Abbildung 5).

Das Ziel beider Assistenzstrategien ist es, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die potenziell kritische Situation in der Kreuzung zu lenken. Hierzu adressieren die genannten Assistenzstrategien unterschiedliche Warnzeitpunkte. Im Übergang vom Informations- in den Warnbereich liegt die visuell-haptische Warnung mit Rampe. Diese verhältnismäßig frühe Rückmeldung an den Fahrer bietet zwei Vorteile. Zum einen wird die Gefahr eventuell durch die haptische Anbremsung entschärft. Zum anderen wird die Warnung nur für den Fahrer offensichtlich. Schließlich wissen die Mitfahrer nicht, wodurch die Verzögerung zustande gekommen ist. Dieser Effekt wird bei dieser Assistenz dadurch verstärkt, dass keine Akustik zum Einsatz kommt.

Am letztmöglichen Warnzeitpunkt erfolgt die visuell-auditiv-haptische Warnung. Durch die ruckartig auftretende haptische Anbremsung und die Akustik soll dem Fahrer die Kritikalität der Situation und die Dringlichkeit einer Reaktion verdeutlicht werden. Zur Bestimmung des letztmöglichen Warnzeitpunkts wird von einem Anhalteweg mit einer Reaktionszeit von 1 s, einer haptischen Anbremsung von 3 m/s^2 und einer Verzögerung durch den Fahrer von 6 m/s^2 ausgegangen.



Abbildung 5: Warnsymbol im Head-Up Display und Instrumenten-Kombi bei visuell-auditiv-haptischer Warnung vor einem vorfahrtsberechtigten Motorrad.

3.2. Evaluierung der Grundakzeptanz der Assistenz und Ableitung der favorisierten Assistenzstrategie

Schwankende Fehler in der per GPS bestimmten Fahrzeugposition haben zur Folge, dass unter Umständen bei unterschiedlichen Kreuzungsannäherungen zu verschiedenen Zeitpunkten gewarnt wird. Die Vorhersagbarkeit einer Systemreaktion ist für die Akzeptanz des Systems jedoch von großer Bedeutung. Ziel der Untersuchung ist es deshalb, die vom Fahrer akzeptierten Abweichungen im Warnzeitpunkt zu ermitteln, um daraus auf eine Abschätzung für die maximal zulässige Positionsabweichung zu schließen. Dazu wird die Fahrzeugposition zunächst auf Basis einer Carrier Phase Differential GPS (CPDGPS) gestützten Inertialplattform hochgenau bestimmt, sodass die Abweichung dann gezielt vorgegeben werden kann. Dies erfolgt durch die Addition mehrerer vordefinierter „Offsets“ zur Warnentfernung. Hierdurch werden für alle Versuchspersonen exakt vergleichbare Versuchsbedingungen geschaffen. Der Aufbau dieses Beispielszenarios ist in Abbildung 6 dargestellt.

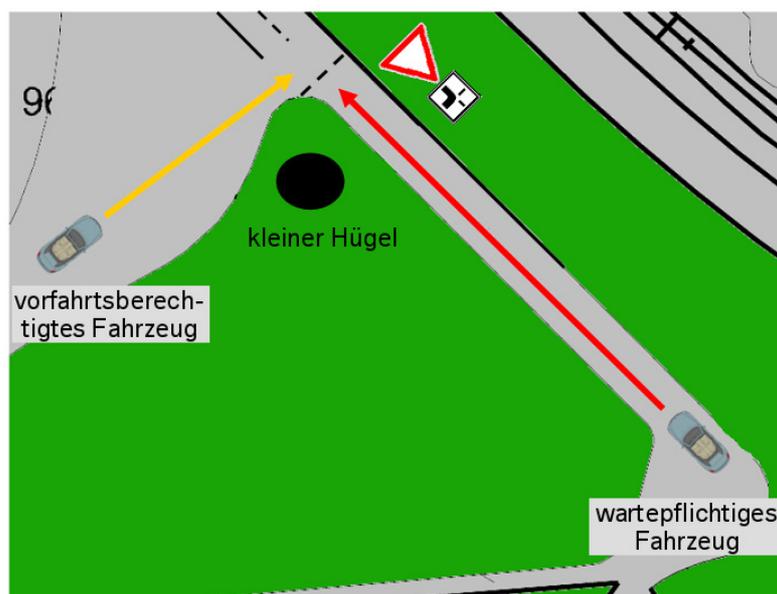


Abbildung 6: Kritische Kreuzungssituation zum Nachweis der Grundakzeptanz der Assistenz.

Jede Versuchsperson nähert sich mit der visuell-haptischen Warnung mit Rampe und der visuell-auditiv-haptischen Warnung jeweils rund zehnmal in zwei verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen an die Kreuzung an: 30-50 km/h bzw. 50-70 km/h. Die Versuchsperson ist angehalten das Fahrzeug erst dann zu verzögern, wenn eine Warnung erfolgt. Das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug nähert sich immer so an, dass eine hohe Kollisionsgefahr besteht. Das wartepflichtige Fahrzeug verzögert aus Sicherheitsgründen auf seine virtuelle Haltelinie, sodass sich keine Kollision ereignet, wenn das wartepflichtige Fahrzeug die Haltelinie überfährt. Die Verzögerung des vorfahrtsberechtigzten Fahrzeugs erfolgt aber erst nachdem das wartepflichtige Fahrzeug eine Warnung erhalten hat.

Bei jeder Annäherung erfolgte eine gezielte Variation der Warnentfernung. Im Anschluss an jede Annäherung beurteilt die Versuchsperson den Warnzeitpunkt hinsichtlich „viel zu früh“, „eher zu früh“, „genau rechtzeitig“, „eher zu spät“ oder „viel zu spät“.

Für die Auswertung ist nur der Bremszeitpunkt und nicht der Warnzeitpunkt aussagekräftig, da die Versuchspersonen sowohl über die Funktion des KQA als auch über die kritische Kreuzungssituation informiert sind. Damit ist zu erwarten, dass die Reaktionszeit unrealistisch kurz ist. Daher wird die Beurteilung des Warnzeitpunktes dem jeweiligen Bremszeitpunkt zugeordnet.

In Abbildung 10 wird das Ergebnis für die visuell-auditiv-haptische Warnung dargestellt. Es zeigt die erforderliche Verzögerung ab Bremsbeginn für einen Stopp an der Haltelinie über der Geschwindigkeit zu Bremsbeginn. Zu jedem angefahrenen Punkt wird die Beurteilung durch die Fahrer dargestellt.

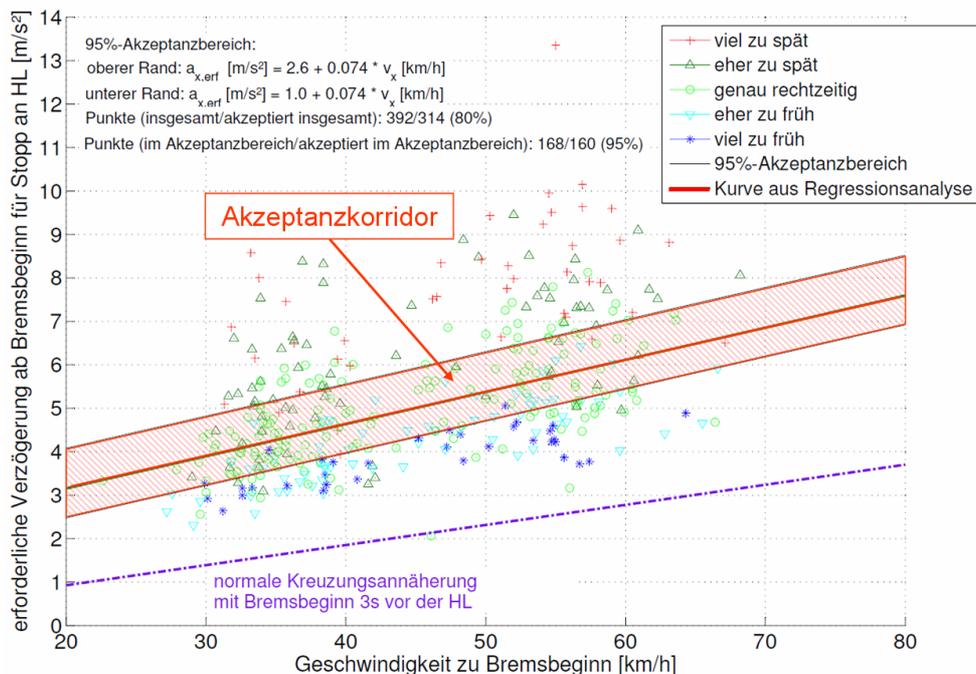


Abbildung 7: Akzeptanz der Assistenzzeitpunkte bei der visuell-auditiv-haptischen Warnung.

Es zeigt sich, dass der Fahrer eine umso höhere Verzögerung akzeptiert, je höher die Geschwindigkeit ist. Auf Grundlage einer Regressionsanalyse wird der Akzeptanzkorridor festgelegt. Die Assistenzzeitpunkte mit der Bewertung „eher zu spät“, „genau rechtzeitig“ oder „eher zu früh“ werden als akzeptiert angesehen. Der Akzeptanzkorridor wird so gewählt, dass 95% der eingeschlossenen Bremszeitpunkte als akzeptiert bewertet wurden. Diese Regressionsanalyse wurde für beide Warnstrategien durchgeführt.

Als weiteres Ergebnis zeigte sich, dass die visuell-auditiv-haptische Warnung gegenüber der visuell-haptischen Warnung mit Rampe favorisiert wird.

3.3. Evaluierung der Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung

Ein Ziel der Evaluierung des KQA besteht im Nachweis der Wirksamkeit des KQA zur Unfallvermeidung. Um dies nachzuweisen wurde die favorisierte Assistenzstrategie (visuell-auditiv-haptische Warnung) in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario durch einen Probandenversuch untersucht.

Eine potenzielle Kollision wird als „erfolgreich verhindert“ angesehen, wenn das wartepflichtige Fahrzeug vor der Haltelinie zum Stehen kommt. Das repräsentative, kritische Beispielszenario ist dadurch gekennzeichnet, dass:

- sich die Kreuzungsgeometrie und die Ursache für die kritische Kreuzungssituation aus der Unfallstatistik ableiten und denen bei den häufigsten Unfallsituationen mit Querverkehr entsprechen, d.h. eine 90°-Winkel-Kreuzung vorliegt, die Fahrstreifen keine Krümmung aufweisen und die Unfallursache in Unaufmerksamkeit, Fehleinschätzung oder Sichtbehinderung besteht [9].
- der wartepflichtige Fahrer unfreiwillig in die kritische Kreuzungssituation gerät.
- nur ein Stopp des wartepflichtigen oder vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs vor dem Eintritt in den Gefahrenbereich die Kollision verhindert.

Der Aufbau des Beispielszenarios ist in Abbildung 6 dargestellt. Das wartepflichtige Fahrzeug nähert sich mit einer von der Versuchsperson gewählten Geschwindigkeit an, während das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug noch steht. Rund 4 s vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt wird die Versuchsperson gezielt abgelenkt. Dies wird dadurch erreicht, dass die Versuchsperson aufgefordert wird, die Aufschrift auf einer Vignette in der linken Seitenscheibe vorzulesen.

Über das Kommunikationssystem sendet das wartepflichtige Fahrzeug 2 s vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt ein Abfahrtssignal. Hierauf setzt sich das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug in Bewegung und tritt in den Sichtbereich des wartepflichtigen Fahrzeugs. Die Annäherung erfolgt so, dass eine hohe Kollisionsgefahr zwischen den beiden Fahrzeugen besteht. Beim letztmöglichen Warnzeitpunkt erfolgt bei der Hälfte der Versuchspersonen eine visuell-auditiv-haptische Warnung. Die andere Hälfte der Probanden erhält keine Warnung und dient als „Baseline“. Aus Sicherheitsgründen verzögert das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug auf seine „virtuelle“ Haltelinie, um auch im Falle einer Vorfahrtsmissachtung durch den wartepflichtigen Fahrer eine Kollision zu vermeiden. Diese Verzögerung erfolgt aber erst, wenn das wartepflichtige Fahrzeug den letztmöglichen Bremszeitpunkt überschritten hat.

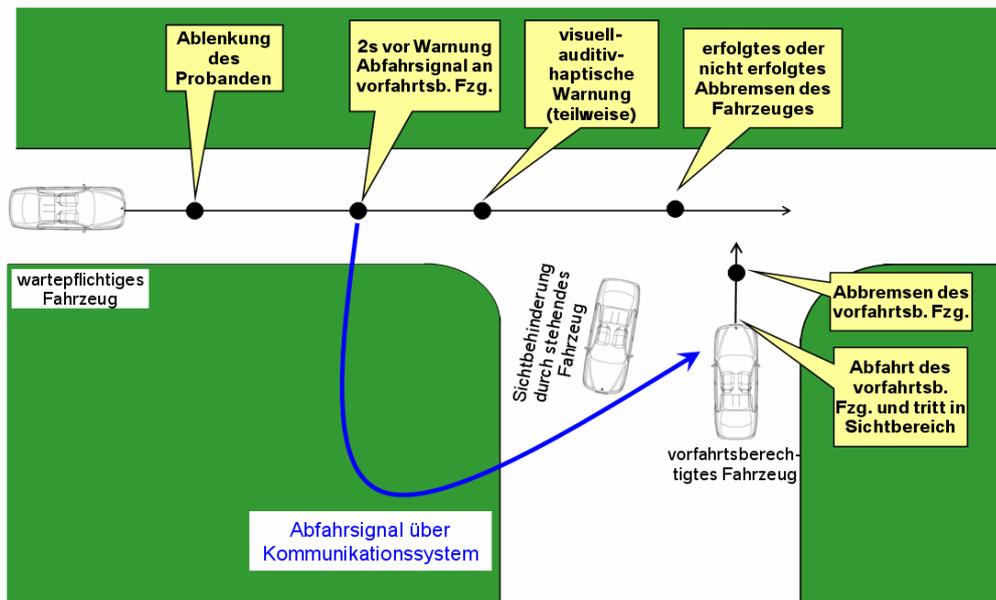


Abbildung 8: Kritisches Kreuzungsszenario zum Nachweis der Wirksamkeit der Assistenz zur Unfallvermeidung.

Die Messdaten einer Versuchsperson werden nur für eine weitere Auswertung verwendet, wenn diese erfolgreich abgelenkt wurde.

Zur Beurteilung der Ablenkung werden zwei Informationsquellen genutzt:

- subjektive Beurteilung durch den Versuchsleiter
- objektives Kriterium auf Grundlage der Messdaten

Nur wenn beide Beurteilungen eine Ablenkung des wartepflichtigen Fahrers ergeben, wird auf Ablenkung entschieden. Das objektive Kriterium zur Beurteilung der Ablenkung basiert auf einer Reaktionszeitbetrachtung. Untersuchungen im Fahrsimulator haben gezeigt, dass die Reaktionszeit bei einem tendenziell erwarteten Ereignis bei mindestens 0,5 s liegt [4]. In der Literatur wird häufig als durchschnittliche Reaktionszeit 1 s angegeben. Daher wird davon ausgegangen, dass die maximale Reaktionszeit bei einer Person in guter körperlicher und geistiger Verfassung meist unter 1,5 s liegt. Diese Werte haben sich bereits in Vorversuchen bewährt.

Wie bereits angesprochen, fährt das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug gut 1 s, bevor das wartepflichtige Fahrzeug den Warnzeitpunkt erreicht, los. Ab diesem Zeitpunkt hat der wartepflichtige Fahrer die Möglichkeit, das vorfahrtsberechtigte Fahrzeug zu sehen. Die Reaktionszeitbetrachtung wird in Abbildung 7 dargestellt. Die vertikale Linie bei 0 s kennzeichnet den Warnzeitpunkt. Entsprechend 1 s davor besteht der Abfahrtszeitpunkt des vorfahrtsberechtigten Fahrzeuges.

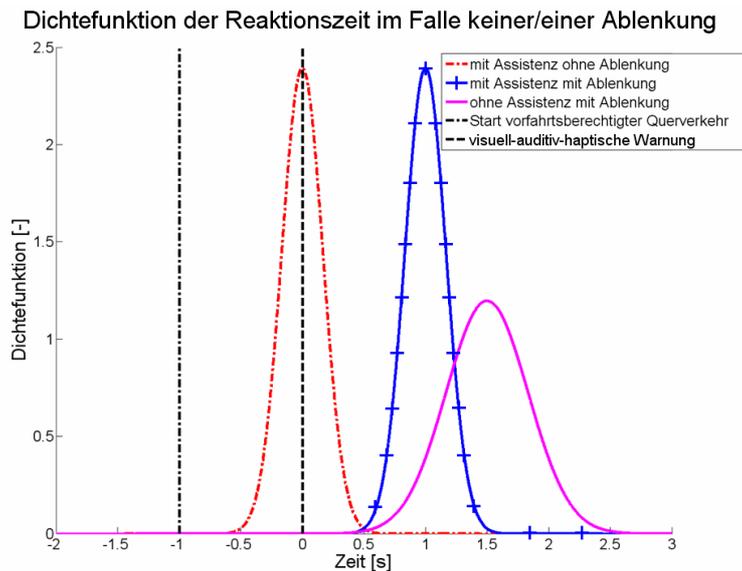


Abbildung 9: Reaktionszeitbetrachtung als Grundlage zur objektiven Beurteilung ob der wartepflichtige Fahrer abgelenkt war oder nicht.

Reagiert der wartepflichtige Fahrer im Bereich von 0,5 s vor oder nach dem Warnzeitpunkt, wird davon ausgegangen, dass der Proband nicht abgelenkt war. Seine Reaktion lässt sich offensichtlich nicht auf die Warnung zurückführen.

Vielmehr wurde vom Fahrer bereits vor der Warnung die kritische Kreuzungssituation erkannt. Erfolgt hingegen eine Reaktion später als 0,5 s nach dem Warnzeitpunkt, wird von einer erfolgreichen Ablenkung ausgegangen. Von einer erfolgreichen Interpretation der Warnung wird ausgegangen, wenn die Reaktion von 0,5 bis 1,5 s nach der Warnung erfolgt.

Bei den Versuchen zeigte sich, dass von den Fahrern, die eine KQA-Assistenz erhalten haben, 85% die Warnung richtig interpretierten und 75% auch erfolgreich reagierten. Diese Fahrer haben die kritische Kreuzungssituation erfolgreich entschärft. Ohne KQA-Assistenz reagierten nur 8% der Fahrer erfolgreich. Das heißt, 92% wären in eine Kollision verwickelt worden, hätte das vorfahrtsberechtigzte Fahrzeug nicht verzögert.

	Erfolgreiche Reaktion	Erfolgreiche Reaktion	gesamt [Anzahl]
ohne Warnung	92%	8%	25
mit Warnung	25%	75%	20
gesamt [Anzahl]	28	17	45

Abbildung 10: Verteilung der nicht erfolgreichen und erfolgreichen Reaktionen im Fall einer kritischen Kreuzungssituation ohne bzw. mit Warnung.

Damit ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 0,1%, also hoch signifikant, der Nachweis erbracht, dass mit dem KQA in einem repräsentativen, kritischen Beispielszenario mehr Kollisionen erfolgreich verhindert werden als ohne.

4. Fahrerverhaltensuntersuchung zur Erweiterung der Kreuzungsassistentenz

Die bisher vorgestellten Akzeptanzuntersuchungen beziehen sich ausschließlich auf die Situation Einbiegen/Kreuzen „ohne Stopp an der Haltelinie“. Zur Weiterentwicklung des Systems für den Fall „mit Stopp an der Haltelinie“ und Linksabbiegen, ist es wichtig zu wissen, wie sich die Fahrer im Normalfall verhalten. Von Interesse ist hier vor allem die Entscheidung des Fahrers, ob und wann er den Einbiegevorgang beginnt. Angenommen der Fahrer muss anderen Fahrzeugen die Vorfahrt gewähren, hängt diese Entscheidung unter anderem vom Abstand dieser Fahrzeuge von der Kreuzung und deren Geschwindigkeit ab. Diese beiden Werte lassen sich in einer Zeitlücke zusammenfassen. Welche Zeitlücken Fahrer beim Einbiegen/Kreuzen wählen, soll durch eine Videobeobachtung einer Straßenkreuzung ermittelt werden. Es ist zu erwarten, dass die Fahrer beim Anfahren von der Haltelinie geringere Zeitabstände zu anderen Fahrzeugen nutzen als bei einer Durchfahrt ohne Stopp.

4.1. Technische Umsetzung der Methode

Diese Arbeit beschreibt ein nahezu automatisiert ablaufendes Verfahren, welches das Videobild auswertet und daraus die entsprechenden Zeitlücken extrahiert. Es wurden dabei ausschließlich anonyme Daten erhoben. Eine Erkennung von KFZ-Kennzeichen oder Personen fand nicht statt (und wäre aufgrund der niedrigen Kameraauflösung auch technisch nicht möglich).

Für eine erste Evaluierung des Ansatzes wurde eine T-Kreuzung gewählt, die durch eine in einem angrenzenden Gebäude aufgestellte Mini-DV-Kamera gefilmt wurde. Abbildung 11 zeigt ein Standbild aus einem der Videofilme. Fahrzeuge, die sich von Westen (Triggerpunkte W) der Kreuzung nähern, müssen die Vorfahrt achten.

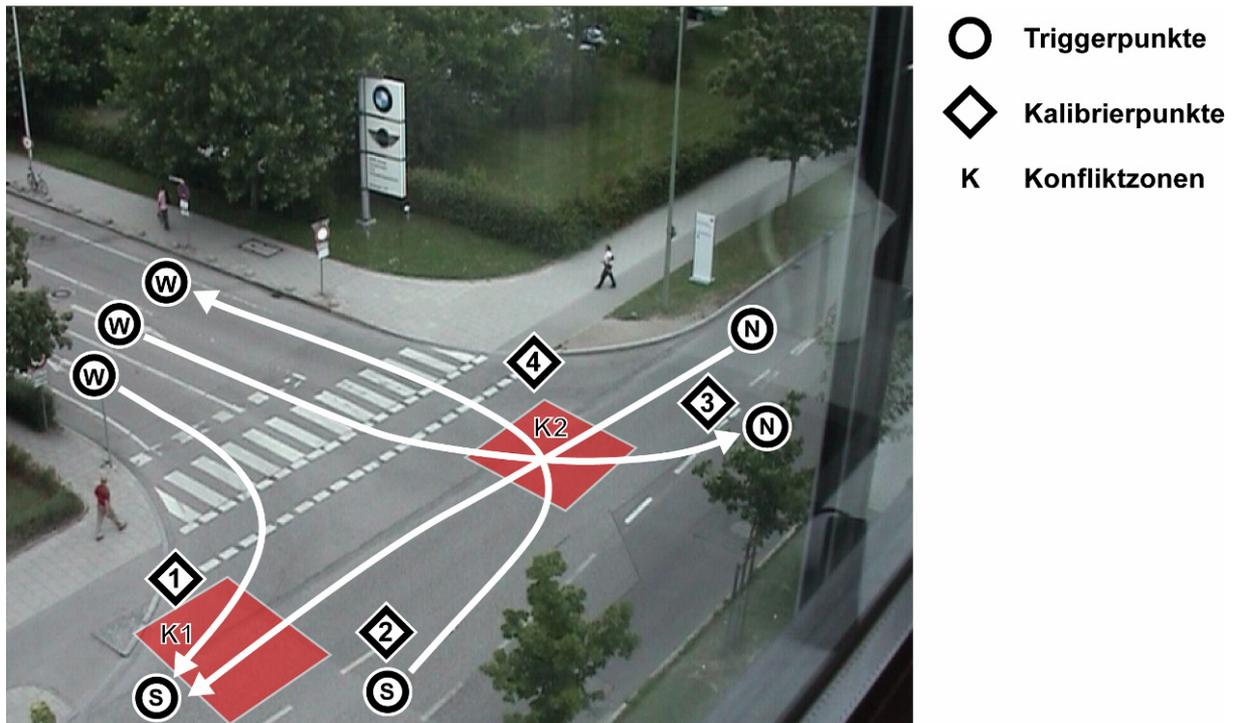


Abbildung 11: Kreuzung mit möglichen Fahrwegen und Konfliktzonen.

Segmentierung der relevanten Objekte

Da sich die Kameraposition nicht ändert, können Objekte auf der Straße durch einfache Hintergrundsubtraktion segmentiert werden. In der Praxis ist für die Adaption an die Beleuchtungsverhältnisse noch eine Anpassung des statischen Hintergrundbildes notwendig. In dieser Arbeit wurde deshalb ein adaptives Hintergrundmodell nach [8] verwendet.

Transformation der Koordinaten

Die Segmentpositionen im Bild sind in Pixel-Koordinaten gegeben. Diese müssen in metrische Weltkoordinaten umgerechnet werden. Dazu nimmt man an, dass die Straßenoberfläche annähernd eine Ebene ist und berechnet über gegebene Kalibrierpunkte, d.h. Paare aus Pixel- und Weltkoordinaten, eine Transformationsmatrix [7]. Für eine eindeutige Lösung sind genau vier Koordinatenpaare notwendig. Mit mehr als vier Punkten kann der Abbildungsfehler über Optimierungsverfahren verkleinert werden.

Aus praktischen Gründen wurden die Ecken von Straßenmarkierungen als Kalibrierpunkte verwendet (siehe Abbildung 11 Punkte 1 bis 4).

Tracking der Objekte

Das Tracking übernimmt das auf Reid [11] zurückgehende und in vielen Anwendungen bewährte (z.B. [6][12][14]) Multi-Hypothesen-Verfahren. Als Basis dient das in [3] entwickelte Framework, welches im Rahmen dieser Arbeit an die Eigenschaften der zu verfolgenden Objekte angepasst wird.

Ein Multi-Hypothesen-Tracker (MHT) schiebt die Entscheidung darüber, welche Messwerte welchen Objekten zugeordnet werden, einige Zeitschritte hinaus. Er betrachtet immer die letzten n Zuordnungen und verfolgt auch mehrere Varianten (Hypothesen). Dadurch ist es

möglich, zuverlässige Entscheidungen zu treffen, denn nur ausreichend wahrscheinliche Hypothesen werden an die Anwendung weitergegeben. Da die Analyse in dieser Arbeit vollständig offline durchgeführt wird, spielt die prinzipbedingte Verzögerung des MHT-Ansatzes keine Rolle.

Wie die meisten Tracker verwendet das Multi-Hypothesen-Framework Kalman-Filter, um aus verrauschten Sensorinformationen die Zustandsgrößen zu schätzen. Kalman-Filter erlauben eine wahrscheinlichkeitstheoretische Modellierung von stochastischen Prozessen und deren Eingangsgrößen [16]. In dieser Arbeit wurde ein einfacher Zustandsvektor bestehend aus der Position in Weltkoordinaten und der Geschwindigkeit in die zwei Koordinatenrichtungen verwendet.

Analyse der Verkehrssituationen

Zunächst werden die vom Tracker erzeugten Trajektorien einem der vorher definierten Fahrwege zugeordnet (siehe Pfeile in Abbildung 11). Dies geschieht durch Triggerpunkte, die sich jeweils an den Zufahrten zur Kreuzung befinden (die Buchstaben stehen für Himmelsrichtungen). Unterschreitet eine Objekt-Trajektorie einen festgelegten Trigger-Abstand zu einem dieser Punkte, so wird das entsprechende Objekt mit einer Markierung versehen. So lassen sich alle möglichen Fahrwege durch eine Kombination aus zwei Triggerpunkt-Namen beschreiben (z.B. West-Süd oder Nord-Süd). Durch fehlerhafte Segmentierung oder Ausfälle beim Tracking kann es vorkommen, dass ein Objekt nur einen oder keinen Trigger-Punkt „überfährt“. Solche Objekte werden nicht weiter betrachtet.

Um Zeitlücken berechnen zu können, müssen Trajektorien von mehreren Fahrzeugen zueinander in Bezug gesetzt werden. Dies geschieht über eine oder mehrere Konfliktzonen, in denen sich die Fahrtwege kreuzen. Die Zeitlücke wird über eine Zeitmessung bestimmt, die startet, wenn das erste Fahrzeug die Konfliktzone gerade verlässt und die stoppt, wenn das zweite Fahrzeug in die Konfliktzone einfährt. Abhängig von der Situation kann entweder das erste Fahrzeug oder das zweite Fahrzeug vorfahrtsberechtigt sein. Für die Auswertung kann die Zeitlücke über eine Kombination aus zwei Trigger-Punkt-Paaren angegeben werden: West-Süd → Nord-Süd. Gemeint ist damit die Zeitlücke zwischen einem Fahrzeug, das von Westen kommend vor einem Fahrzeug, das von Nord nach Süd fährt, einbiegt.

4.2. Erste Ergebnisse

Die Auswertung der ersten zwei Videos von jeweils 90 Minuten Dauer ergab insgesamt ca. 4400 registrierte Fahrzeuge und ca. 150 relevante Verkehrssituationen, d.h. Verkehrskonstellationen, die eine Ermittlung einer Zeitlücke zulassen. Abbildung 12 zeigt jeweils die aggregierten Fahrzeugtrajektorien für beide Videos.

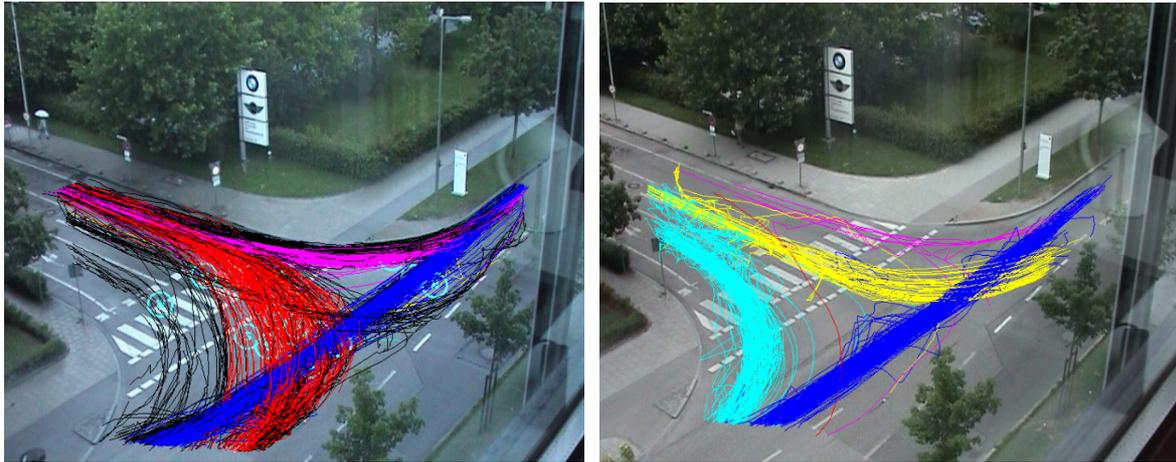


Abbildung 12: Fahrzeug-Trajektorien für zwei Videos mit jeweils 90 Minuten Dauer (linkes Bild vormittags, rechtes Bild nachmittags).

Abbildung 13 zeigt die Zeitlücken, die Fahrer noch akzeptierten, wenn sie von der westlichen Zufahrt nach rechts in die Hauptstraße einbogen.

Abbildung 14 zeigt die Zeitlücken von Fahrern, die von Süden kommend links in die Nebenstraße abbogen und dabei den Gegenverkehr beachten mussten.

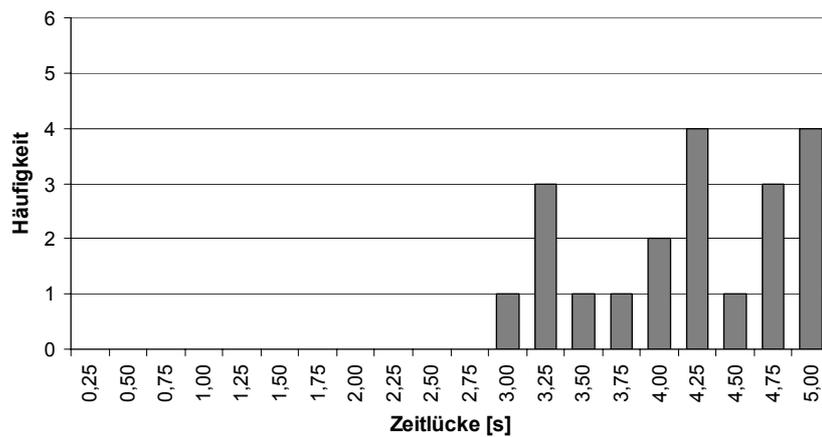


Abbildung 13: Zeitlücken beim rechts Einbiegen mit „Vorfahrt achten“, wobei das wartepflichtige Fahrzeug vor dem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug in die Kreuzung einfährt. (West-Süd → Nord-Süd in Abbildung 11)

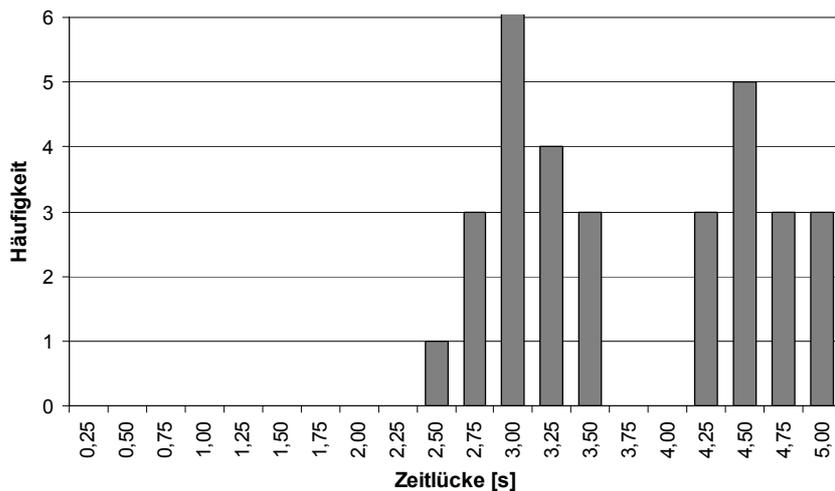


Abbildung 14: Zeitlücken beim Linksabbiegen, wobei das wartepflichtige Fahrzeug den Abbiegevorgang durchführt, bevor das vorfahrtsberechtigige Fahrzeug die Kreuzung erreicht. (Süd-West → Nord-Süd in Abbildung 11)

Auch wenn bisher nur wenige Stützpunkte für die Histogramme vorliegen, zeigt sich eine erkennbare Übereinstimmung der Zeitlücken in Abbildung 14 mit den manuell ausgewerteten Daten in [15]. Es treten keine Zeitlücken kleiner als 2,5 Sekunden auf. Ein Anstieg in Richtung längerer Zeitlücken ist vorhanden, lässt sich aber aufgrund zu geringer Ereignisanzahl noch nicht eindeutig nachweisen.

Um die Genauigkeit des Systems zu überprüfen wurden stichprobenartig Zeitmessungen manuell kontrolliert. Es zeigte sich eine hohe Übereinstimmung der Werte. Messfahrten mit einem DGPS-Fahrzeug sollen künftig eine objektive Aussage zur Genauigkeit der Methode ermöglichen. So lassen sich „ground truth“-Trajektorien ermitteln und mit den aus der Bildverarbeitung berechneten vergleichen.

Die vorgestellte Methode liefert einen Anhaltspunkt, welche Zeitlücken von den Fahrern akzeptiert werden.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das entwickelte Kreuzungsassistenzsystem, ein kommunikationsbasierter Querverkehrsassistent, adressiert das Einbiegen/Kreuzen „ohne Stopp an der Haltelinie“. Im Gegensatz zu bisher bekannten prototypisch entwickelten Querverkehrsassistenzsystemen werden hier auch unscharfe Realdaten in der Auslegung mit betrachtet. Diese resultieren aus Messfehlern bei der Positionsbestimmung sowie unbekanntem Fahrzustandsänderungen des Fremdfahrzeugs während der Latenzzeit der Datenübertragung zwischen dem Fremd- und Eigenfahrzeug.

Die Abweichungen der Fahrzeugpositionen werden bei der Beurteilung des Kollisionsrisikos in einem kritischen Bereich mit berücksichtigt. Hinsichtlich der Wahl der Assistenzstrategie und deren Auslegung stellen diese Unsicherheiten eine große Herausforderung dar. Sie führen zu Schwankungen im Warnzeitpunkt. Für den KQA wurden zwei unterschiedliche Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte entwickelt, visuell-haptische Warnung mit Rampe

und visuell-auditiv-haptische Warnung, und hinsichtlich der Grundakzeptanz eines variierenden Warnzeitpunktes untersucht. Im Rahmen von Probandenversuchen konnte in einer repräsentativen kritischen Kreuzungssituation für beide Assistenzstrategien ein Korridor bestimmt werden, in dem 95% der Warnzeitpunkte akzeptiert wurden. Als favorisierte Assistenzstrategie wurde von den Versuchspersonen die visuell-auditiv-haptische Warnung ausgewählt.

In Tests, welche die typische Kreuzungsgeometrie mit der größten Unfallhäufigkeit sowie die Fahrerunachtsamkeit und die Sichtverdeckung als besonders häufige Unfallursachen berücksichtigen, wurde der Nutzen nachgewiesen. Damit ist gelungen, einen für den realen Fahrbetrieb tauglichen KQA zu entwickeln. Die Ergebnisse zeigen, dass der gewählte KQA-Ansatz ein vielversprechendes Konzept für die Erhöhung der Kreuzungssicherheit darstellt.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Kreuzungsassistenz auf das Einbiegen/Kreuzen „mit Stopp an der Haltelinie“ sowie das Linksabbiegen wurde eine videogestützte Kreuzungsbeobachtung durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse müssen zwar noch durch eine Erhöhung der Fallzahlen sowie durch Ausdehnung der Untersuchung auf andere Kreuzungen statistisch abgesichert werden. Als ein erstes Ergebnis zeigt sich jedoch, dass die minimalen Zeitlücken beim Einbiegen nach rechts 3,0 s und beim Linksabbiegen 2,5 s betragen.

Für die Auslegung des Warnsystems bedeutet dies, dass Zeitlücken unter diesen Grenzen auf einen Fahrfehler hindeuten und eine Warnung gerechtfertigt ist. Die Überlegungen in [9] zeigen, dass kleinere Zeitlücken zu einer höheren Anforderung an die Positionsgenauigkeit führen. Die Aufgabe weiterführender Arbeiten besteht darin, den KQA für den Fall „mit Stopp an der Haltelinie“ zu erweitern und dabei ein geeignetes Sensorsystem zu entwickeln, welches die höheren Anforderungen an die Genauigkeit gewährleistet.

6. Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt: „Verkehr-Verkehrsunfälle-Strukturdaten 2006“, www.destatis.de. Wiesbaden, 2007 - Technischer Bericht.
- [2] Cox, I.J. und S.L. Hingorani: An Efficient Implementation and Evaluation of Reid's Multiple Hypothesis Tracking Algorithm for Visual Tracking. In: ICPR94, Seiten A: 437–442, 1994.
- [3] Donath, Max et al.: Intersection Decision Support: An Overview - Final Report. University of Minnesota, September 2007 – Technischer Bericht.
- [4] Donges, E.: Vorlesungsskript Fahrerassistenzsysteme. Garching bei München, 2007 –Gastvorlesung.
- [5] Flemisch: The H-metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction. 2003 – Technischer Bericht.
- [6] Gong, Yihong: Integrated Object Detection and Tracking by Multiple Hypothesis Analysis. NEC Journal of Advanced Technology, 2005.
- [7] Hartley, Richard, Andrew Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision, 2004.
- [8] KaewTraKulPong, P. und R. Bowden: An Improved Adaptive Background Mixture Model for Real-time Tracking and Shadow Detection, 2001.
- [9] Klanner, Felix; Ehmanns, Dirk; Winner, Hermann: ConnectedDrive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz. In 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. Aachen, 09.-11. Oktober 2006.
- [10] Klanner, Felix: Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz. Diplomarbeit Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München, München, 2004.
- [11] Reid, D. B.: An algorithm for tracking multiple targets, 1979.
- [12] Schmitt, Thorsten, Michael Beetz, Robert Hanek und Sebastian Buck: Watch their Moves: Applying Probabilistic Multiple Object Tracking to Autonomous Robot Soccer, 2001.
- [13] Sengupta, Raja et al.: Cooperative collision warning systems: Concept definition and experimental implementation. Berkeley, June 2006 - PATH project report.
- [14] Taylor, Geoffrey und Lindsay Kleeman: A Multiple Hypothesis Walking Person Tracker with Switched Dynamic Model, 2003.
- [15] Vollrath, Mark, Martin Brünger-Koch, Caroline Schießl, Falko Waibel: INVENT Endbericht Kreuzungsverhalten – Normalverhalten, Beanspruchung und kritische Situationen bei Kreuzungsfahrten, 2004.
- [16] Welch, Greg und Gary Bishop: An Introduction to the Kalman Filter. Technischer Bericht, 1995.