

# Linksabbiegeassistentz

## Beispiel für die Top-Down-Entwicklung eines Aktiven Sicherheitssystems

Dipl.-Ing. **Karl-Heinz Meitinger**, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, München

Prof. Dr.-Ing. **Bernd Heißing**, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, München

Dr.-Ing. **Dirk Ehmanns**, BMW Group Forschung und Technik, München

### Kurzfassung:

Kreuzungsumgebungen stellen mit ihrer hohen Komplexität und ihren vielfältigen Ausprägungen enorme Ansprüche an zukünftige Aktive Sicherheitssysteme. Herkömmliche Entwicklungsmethoden, die oft von Bottom-Up-Vorgehensweisen geprägt sind, bergen besonders in diesen Umgebungen das Risiko, im Verhältnis zum Aufwand der Umsetzung nur geringes Unfallvermeidungspotential auszuschöpfen. In diesem Beitrag wird ein prototypisches Aktives Sicherheitssystem zur Vermeidung von Kollisionen zwischen links abbiegendem und entgegenkommendem Fahrzeug (Linksabbiegeassistent) vorgestellt, das mittels einer Top-Down-Vorgehensweise im Rahmen des EU-Forschungsprojektes PREVENT entwickelt wurde. Dabei werden vom Unfallgeschehen ausgehend mögliche Assistenzsysteme und die dafür nötigen Situationsanalysen abgeleitet. Das System wurde sensorunabhängig in einem Fahrsimulator umgesetzt und kann dort getestet werden. Erst am Ende werden Anforderungen an eine Umgebungserfassung bestimmt.

Der vorgestellte Linksabbiegeassistent basiert auf einem 3D-Fahrerverhaltensmodell, das an die aktuelle Kreuzungssituation angepasst wird. Bei einer Kollisionsgefahr kann das System durch einen aktiven Bremseneingriff den Unfall verhindern. Dies ist möglich, sowohl wenn das links abbiegende Fahrzeug aus dem Stand anfährt, als auch wenn es ohne anzuhalten direkt abbiegt.

## 1 Einleitung

Aktive Sicherheitssysteme leisten einen zunehmenden Beitrag zu Komfort und Sicherheit im Straßenverkehr.

Das Spektrum der verfügbaren Systeme reicht dabei von informierenden Systemen wie Navigationssystemen, die eher komfortorientiert sind, über Systeme wie ACC, die in die Fahrzeugführung eingreifen aber übersteuerbar sind, bis zum autonom agierenden, nicht übersteuerbaren Sicherheitssystem ESP/DSC.

Für autonom agierende Systeme werden bisher ausschließlich fahrzeugeigene Fahrzustandsgrößen benutzt, nur so kann die für den autonomen Eingriff nötige Erfassungssicherheit erreicht werden. Auch greifen autonom agierende Systeme nur auf der untersten Schicht des Drei-Ebenen-Modells der Fahrzeugführung [DONGES, 1978], der Stabilisierungsebene an.

In Zukunft werden auf der Ebene Bahnführung Komfortsysteme und Aktive Sicherheitssysteme zusammenwachsen. Die Systeme werden nicht nur die Zustandsgrößen des eigenen Fahrzeugs erfassen, sondern auch die Umgebung des Fahrzeugs auswerten.

Auch wenn erste Systeme nur warnenden oder unterstützenden Charakter haben werden, sind in bestimmten Situationen autonom eingreifende Systeme unabdingbar, wenn ein hinlängliches Unfallvermeidungspotential erreicht werden soll.

## **2 Vorteile der Top-Down-Entwicklung bei Kreuzungsassistenz**

Die Art und Leistungsfähigkeit der Fahrzustands- und Fahrumgebungserfassung hat entscheidenden Einfluss auf die Möglichkeiten und die Leistungsfähigkeit eines Aktiven Sicherheitssystems. Deshalb gehen Entwicklungsprozesse im Bereich der Aktiven Sicherheit oft von der verfügbaren Sensorik aus. Die Sensorik bestimmt sowohl die Art der erfassbaren Situation als auch die Zuverlässigkeit der Erfassung.

Die Situationserfassung bestimmt wiederum die Applikation, die mit der entsprechenden Sensorik realisiert werden kann. Die Sicherheit der Erfassung beschränkt maßgeblich die Art eines möglichen Systemeingriffs.

Diese Vorgehensweise vom Teilsystem, dem Sensor, zu der komplexen umfassenden Applikation entspricht einer typischen Bottom-Up-Vorgehensweise.

Viele der Systeme, die nach diesem Muster entwickelt werden, sind bei den beiden Unfalltypen wirksam, bei denen in Deutschland die meisten Getöteten und Verletzten zu beklagen sind, Fahrunfälle und Unfälle im Längsverkehr. Bei diesen Unfalltypen ist die Komplexität und Variabilität der kritischen Situationen überschaubar, deshalb ist eine Bottom-Up-Vorgehensweise bei der Entwicklung von Applikationen, die bei diesen Unfalltypen wirksam sein sollen, möglich, weil die Wirkung der Applikation auf das Unfallgeschehen gut abgeschätzt werden kann. In den nächsten Jahren ist durch die Einführung und zunehmenden Verbreitung dieser Systeme mit einer Verschiebung der Verteilung der Unfälle hin zum dritthäufigsten Unfalltyp, dem Kreuzungsunfall, zu rechnen. Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen sind also ein wichtiger Schritt, wenn die Unfallzahlen dauerhaft weiter gesenkt werden sollen.

Die mögliche Komplexität der Situationen und die Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten der Unfall-Untertypen führt bei Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen jedoch dazu, dass eine Bottom-Up-Entwicklung kaum mehr zielführend gestaltet werden kann. Alternativ bietet sich eine Top-Down-Vorgehensweise bei der Entwicklung an.

Unter einer Top-Down-Vorgehensweise wird die Entwicklung von technischen Systemen vom Allgemeinen ins Detail verstanden. Top-Down-Vorgehensweisen finden sich beispielsweise in der Informationstechnologie bei Entwicklungsmethoden für prozedurale Programmiersprachen wie C oder Pascal, wo ein Problem so lange in immer kleiner Teilprobleme zerlegt wird, bis diese beherrschbar sind. Ein weiteres Beispiel ist die Kostenplanung von Produkten beim so genannten „Target Costing“. Dabei werden die Zielkosten aus einem am Markt erzielbaren Preis berechnet [EHRENSPIEL ET. AL., 2002].

Eine Charakteristik der Top-Down-Entwicklungsmethoden ist die starke Orientierung und Ausrichtung an den Eigenschaften und Fähigkeiten des Gesamtsystems und davor noch am „Markt“, der das Gesamtsystem nachfragt. Diese Nachfrage soll das Produkt möglichst gut befriedigen, deshalb werden sowohl die Produkteigenschaften aus der Analyse des Marktes abgeleitet, als auch neue Fragen die während des Entwicklungsprozesses auftreten.

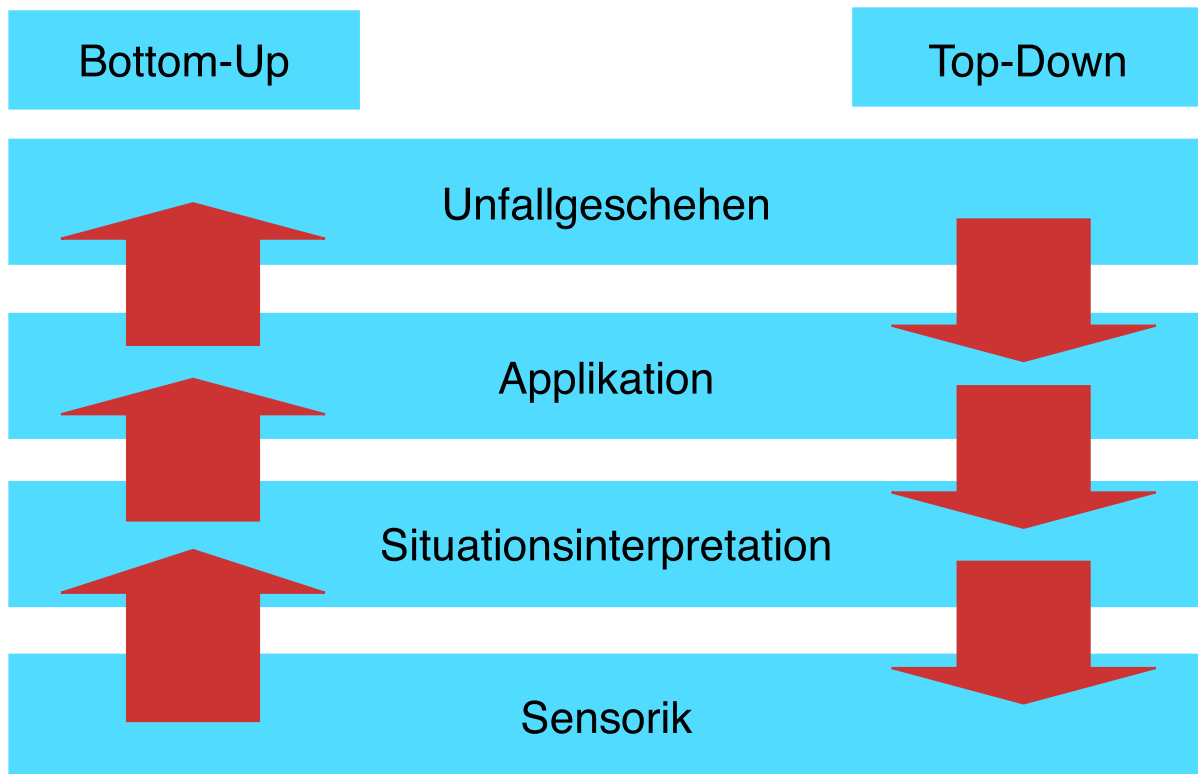


Bild 1: Bottom-Up und Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen.

Im Fall von Aktiven Sicherheitssystemen stellt das Unfallgeschehen den Markt dar, die Unfallanalyse entspricht also der Marktanalyse aus der Anforderungen für das Produkt „Aktives Sicherheitssystem“ abgeleitet werden. Konkret heißt dies, dass Situationen identifiziert werden, bei denen eine hohe Anzahl von Unfällen auftritt, die Charakteristik dieser Situationen analysiert wird, und die Eigenschaften des Aktiven Sicherheitssystems auf diese Charakteristik zugeschnitten werden.

Geeignete Situationen sind solche, aus denen so viele Unfälle entstehen, dass ein ausreichendes Reduktionspotential vorhanden ist, andererseits die Möglichkeit der Unfallvermeidung in dieser Situation durch ein Aktives Sicherheitssystem überhaupt technisch machbar erscheint.

Für die Aufbereitung und Analyse des Unfallgeschehens gibt es mehrere Möglichkeiten. Es können theoretische Überlegungen durchgeführt werden, Experten befragt werden, oder das vergangene Unfallgeschehen betrachtet werden.

Ein Problem von theoretischen Überlegungen und Befragungen ist die Diskrepanz zwischen dem Risikoempfinden des Fahrers und der tatsächlichen Gefährdung durch einen Unfall. Die mögliche Unfallschwere hat unter Umständen ebenfalls wenig Einfluss auf das Gefährdungsempfinden des Fahrers [ELLINGHAUS, 2004]. Diese Faktoren können zu Fehlern bei der Auswahl geeigneter Situationen und Systeme führen. Deshalb ist die Unfallanalyse durch die Betrachtung des vergangenen Unfallgeschehens für die Top-Down-Entwicklung geeigneter.

Ein wichtiger Faktor bei der Unfallanalyse ist die Berücksichtigung der Unfallschwere. Die Häufigkeit einzelner Unfalltypen und Untertypen kann je nach Unfallschwere deutlich variieren. So waren im Jahr 2001 in Deutschland beispielsweise nur 11,89% der Unfälle mit Getöteten aber 29,39% der Unfälle mit schwerem Sachschaden Unfälle beim Einbiegen/Kreuzen [STATISTISCHES BUNDESAMT, 2002]. Die Zahl der Unfälle nimmt aber mit steigender Unfallschwere ab. Die Bewertung des Verhältnisses von Unfallschwere und Unfallhäufigkeit stellt nicht allein aufgrund der ethischen Problematik ein schwieriges Unterfangen dar. [KOCHERSCHIED, 2004]

schlägt als Lösung die Monetarisierung und Bewertung anhand des volkswirtschaftlichen Schadens vor.

Die Möglichkeiten der Analyse des vergangenen Unfallgeschehens sind oft durch die Grenzen von verfügbaren Unfalldatenbanken und Statistiken beschränkt. Die Datenbanken sind ursprünglich oft auf die Auswertung der Passiven Sicherheit der Fahrzeuge optimiert und enthalten deshalb detaillierte Informationen zu Schäden an den Fahrzeugen. Informationen zu Unfallhergang, Situation und Rahmenbedingungen wie Verkehrsaufkommen etc. sind manchmal nur unvollständig dokumentiert. Vorhandene Auswertungen der Datenbanken sind meist wenig geeignet, um spezielle Fragestellungen hinsichtlich der Wirksamkeit von Aktiven Sicherheitssystemen zu beantworten. Die Datenbank und darauf aufgebaute Statistiken müssen bei vielen Einträgen notwendigerweise eine Klassifizierung vornehmen. In dieser können jedoch nie alle möglichen Arten der Klassifizierung berücksichtigt werden. Dadurch können beispielsweise bei der Einteilung nach Unfalltypen zwei zunächst sehr ähnliche Ausprägungen des gleichen Typs zu einer Klasse zusammengefasst werden. Zwei sehr ähnliche Ausprägungen des gleichen Typs können aber nach sehr unterschiedlichen Aktiven Sicherheitssystemen verlangen. Ein Beispiel dafür findet sich bei [MEITINGER, 2004]. Werden fertige Auswertungen der Unfalldatenbanken benutzt, ist es möglich, dass solche wichtigen, feinen Differenzierungen nicht erkannt werden.

Eine gute Möglichkeit, dieser Problematik gerecht zu werden, ist, die Unfalldatenbank mit der besten verfügbaren Detaillierung neu auszuwerten. Die Auswertung kann sich dann optimal an den Bedürfnissen der Top-Down-Vorgehensweise ausrichten. Ziel einer solchen Auswertung ist es zum einen, die Unfälle hinsichtlich möglichen Aktiven Sicherheitssystemen zu klassifizieren, zum anderen, die Charakteristik dieser Unfalltypen möglichst genau zu erfassen, um die Applikation, die gegen den jeweiligen Unfalltyp wirken soll, möglichst zielgerichtet ableiten zu können. Bei der Klassifizierung der Unfälle sollte das Unfallvermeidungspotential des Systems und verschiedener möglicher Ausprägungen abgeschätzt werden.

Sind die Merkmale der Applikation genau festgelegt, können daraus die Anforderungen an die Erfassung der Fahr- und Umgebungssituationen abgeleitet werden. Die nötige Art des Eingriffs (hinweisend, warnend, unterstützend, autonom, siehe Kapitel 3) bestimmt die erforderliche Sicherheit der Situationsinterpretation. Am Ende können Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung festgelegt werden.

Die Top-Down-Vorgehensweise sollte bei der Ableitung der Applikation nicht stringent aufrecht erhalten werden. Eine Abschätzung des Aufwands der Realisierung einer Applikation und der möglichen Anforderungen an die Sensorik schon bei der Unfallanalyse kann verhindern, dass Systeme entwickelt werden, die sich als nicht realisierbar herausstellen. Wesentliches Merkmal ist aber die Top-Down-Orientierung während des ganzen Entwicklungsprozesses. So wird versucht, neu auftauchende Fragestellungen, z.B. bezüglich Feinausprägungen des Systems, zuerst, aber nicht ausschließlich, durch die Unfallanalyse zu beantworten.

### **3 Charakteristik der Linksabbiegeassistentz**

Bei der Analyse von 198 Unfällen der Unfalldatenbank der BMW-Unfallforschung hinsichtlich möglichen Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen wurden 4 Unfallschwerpunkte gefunden für die Aktive Sicherheitssysteme sinnvoll erscheinen: Stop-Schild-Durchfahrt, Rotlichtmissachtung, Linksabbiegen sowie restliches Einbiegen/Kreuzen (siehe Bild 2).

Ein Unfallschwerpunkt mit einer größeren Anzahl von Unfällen, aber auch hohen Anforderungen an ein aktives Sicherheitssystem, ist die Situation „Linksabbiegen“, genauer der Zusammenstoß eines links abbiegenden Fahrzeugs mit einem entgegenkommenden Fahrzeug.

Linksabbiegesituationen kommen in vielen verschiedenen Varianten vor, z.B. mit und ohne separater Linksabbiegespur, mit einer oder mehreren Gegenverkehrsspuren, mit Kreuzungs-

zufahrten in verschiedenen Winkeln oder mit mehreren Kreuzungszufahrten in die nach links abgebogen werden kann. Eine wichtige Unterscheidung ist die, ob der Linksabbieger aus dem Stand anfährt (Anfahren) oder direkt durch die Kreuzung fährt ohne anzuhalten (Durchfahren). Bild 3 zeigt die Verteilung der beiden Situationen in den untersuchten Fällen der BMW-Unfalldatenbank. Die hohe Anzahl der unbekannten Fälle zeigt, dass die Unsicherheit bezüglich der Verteilung relativ hoch ist, jedoch davon ausgegangen werden kann, dass die Anzahl der Durchfahren-Unfälle etwas höher liegt als die der Anfahren-Situationen. Diese Aussage kann durch ähnliche, wenn auch ähnlich ungenaue, Ergebnisse der Analyse der GIDAS-Datenbank [GIDAS] gestützt werden.

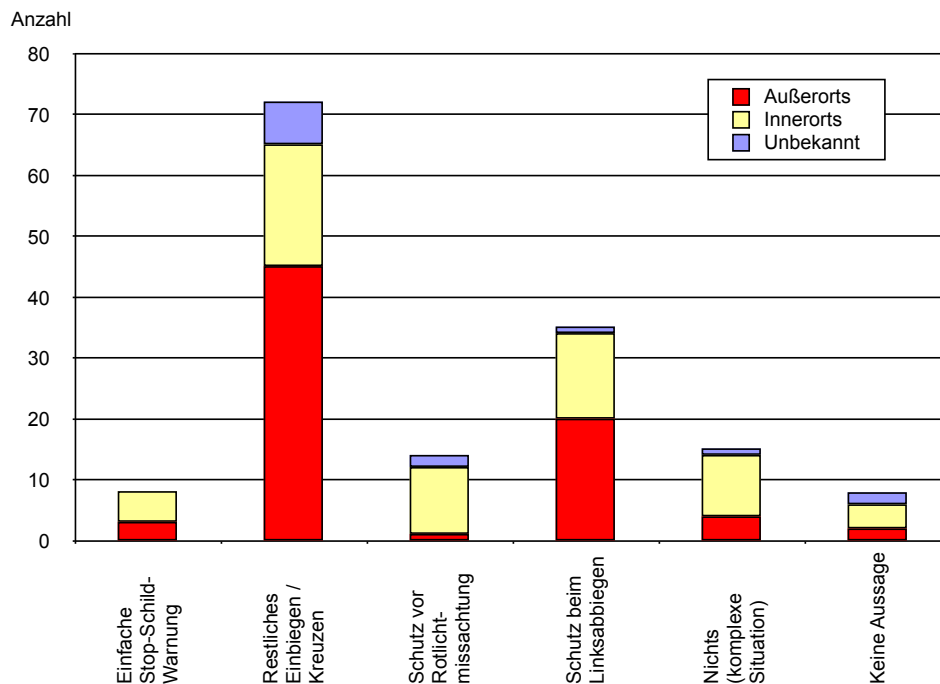


Bild 2: Verteilung der Kreuzungsunfälle der BMW-Unfalldatenbank hinsichtlich möglicher Aktiver Sicherheitssysteme.

Um den Großteil der Linksabbiegeunfälle verhindern zu können muss ein Aktives Sicherheitssystem sowohl die Situationen des Typs „Anfahren“ wie auch des Typs „Durchfahren“ einschließen.

Ein wichtiges Merkmal eines Aktiven Sicherheitssystems ist der Grad der Systemhandlung, für die grob vier Kategorien unterschieden werden:

- **Information:** Der Fahrer wird zeitlich deutlich vor einer kritischen Situation über eine mögliche Gefährdung informiert. Die Dringlichkeit und Intensität ist gering. Der Fahrer hat Zeit zu handeln.
- **Warnung:** Der Fahrer wird vor einer konkreten kritischen Situation mit hoher Dringlichkeit und Intensität gewarnt. Eine Handlung des Fahrers ist unmittelbar erforderlich.
- **Unterstützung:** Der Fahrer wird vor einer konkreten Situation gewarnt. Zusätzlich unterstützt das System die Handlung des Fahrers durch Eingriffe in die Fahrdynamik. Diese sind aber durch den Fahrer übersteuerbar. Die Dringlichkeit ist sehr hoch.
- **Autonomer Eingriff:** Das System greift ohne Zutun des Fahrers in die Fahrdynamik des Fahrzeugs ein. Der Fahrer kann das System nicht oder nur durch bestimmte Handlungen (z.B. Kickdown) übersteuern. Die Dringlichkeit ist maximal.

Mit dem Grad der Systemhandlung steigt die Möglichkeit, Unfälle zu verhindern. Für bestimmte Aktive Sicherheitssysteme ist ein Mindestgrad der Systemhandlung erforderlich, um das System überhaupt darstellbar zu machen. Dies ist dann der Fall, wenn die Situationsinterpretation immer erst so spät erfolgen kann, dass nur eine Handlung höheren Grades, etwa eine autonome Bremsung, den Unfall verhindern kann. Eine Handlung niedrigeren Grades kann hier aufgrund des längeren Anhaltewegs nicht ausreichend sein. Mit dem Grad der Systemhandlung steigt aber auch das Risiko im Falle eines möglichen Systemfehlers.

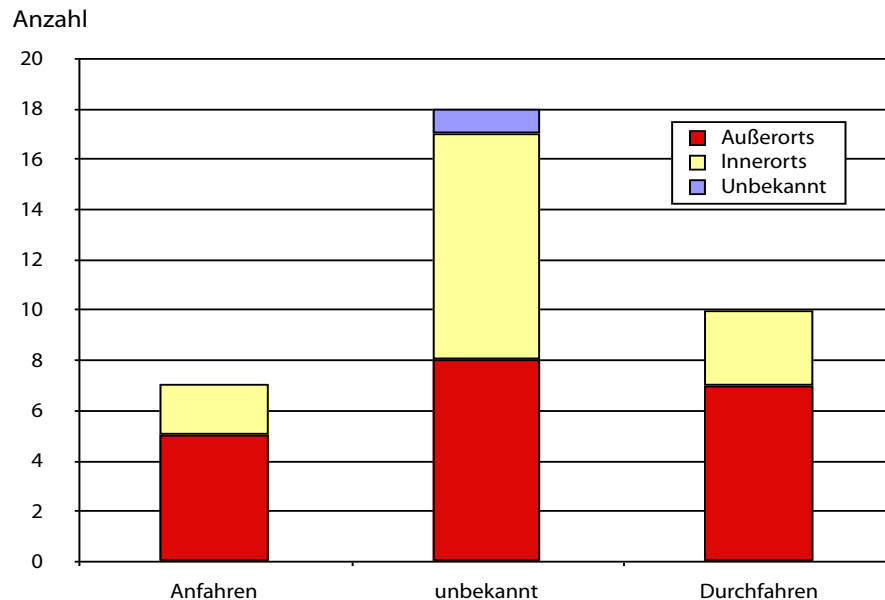


Bild 3: Verteilung der Linksabbiegeunfälle in der BMW-Datenbank nach Situation

Auch innerhalb eines Handlungsgrades sind Unterscheidungen sinnvoll. So ist ein autonomer Eingriff in die Fahrzeuglängsführung weit weniger kritisch als ein Eingriff in die Querdynamik des Fahrzeugs.

Die Situationsinterpretation des Systems besteht aus zwei Hauptkomponenten. Eine Komponente erkennt wann der Fahrer den Abbiegevorgang startet. Gleichzeitig entscheidet die erste Komponente, ob der Fahrer noch vor dem Überqueren der Gegenverkehrsspur anhalten oder durchfahren will. Die zweite Komponente berechnet mit Hilfe eines Fahrerverhaltensmodells für das eigene Fahrzeug und den Daten der entgegenkommenden Fahrzeuge eine Kollisionswahrscheinlichkeit.

Erkennt das System die Durchfahrabsicht (im Fall Durchfahren) oder die Anfahabsicht (im Fall Anfahren) und besteht gleichzeitig eine hohe Kollisionsgefahr, leitet das System eine Handlung ein.

#### 4 Der richtige Handlungszeitpunkt und der richtige Handlungsgrad

Das Planen der Trajektorie beim Linksabbiegevorgang ist eine Aufgabe der zweiten Ebene des 3-Schichten-Modells der Fahraufgaben [DONGES, 1978], der Bahnführungsebene. Im Fall des Linksabbiegevorgangs hat der Fahrer relativ große Freiheit bei der Trajektorienwahl, d.h. er kann die Trajektorie sehr eng oder sehr weit wählen (siehe Bild 4).



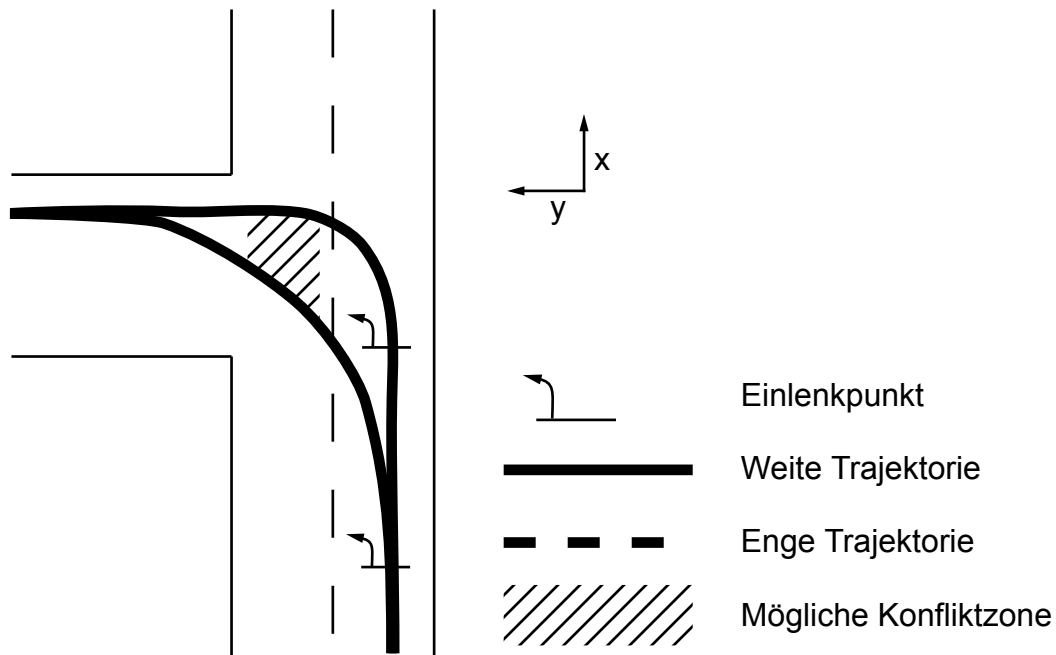


Bild 4: Bereich der Trajektorienwahl und Einlenkpunkte beim Linksabbiegevorgang

Die Systementscheidung, ob der Fahrer durchfahren oder anhalten will, sollte an einem Punkt getroffen werden, an dem ein Anhalten bis zur Konfliktzone noch möglich ist. Der Entscheidungspunkt liegt also um den Anhalteweg vor dem Punkt, an dem das Fahrzeug in die Konfliktzone eindringt (vgl. [MEITINGER, 2004]). Der Spielraum, der dem Fahrer bei der Wahl des Einlenkortes und damit auch des Punktes, an dem das Fahrzeug in die Konfliktzone eindringt, bleibt, ist beim Linksabbiegen aber deutlich größer als der Bremsweg bei einer stärkeren Bremsung aus der typischen Abbiegegeschwindigkeit. Dies führt dazu, dass ein Entscheidungspunkt nicht sinnvoll festgelegt werden kann. Wird der Entscheidungspunkt beispielsweise so gewählt, wie es für sehr enge Trajektorien nötig ist, also früh vor der Kreuzung, wird immer dann eine False-Positive-Handlung (also das Auslösen des Systems obwohl keine kritische Situation vorliegt) erzeugt, wenn der Fahrer eine weite Trajektorie fahren will. Bei Festlegung des Entscheidungspunktes für weite Trajektorien wird bei Fahrern, die eine enge Trajektorie wählen, keine Handlung ausgelöst, auch wenn die Situation kritisch ist (False-Negative).

Die Trajektorienwahl und die Anhalteabsicht ist für das Assistenzsystem erst erkennbar, wenn der Fahrer den Linksabbiegevorgang beginnt, also einlenkt. Eine Entscheidung über die Auslösung der Systemhandlung kann also erst am Einlenkpunkt erfolgen. In Bild 4 sind die Einlenkpunkte der verschiedenen Trajektorien eingezeichnet. Für die Machbarkeit des Aktiven Sicherheitssystems und die Auswahl des Grades der Systemhandlung ist entscheidend, dass ein Anhalten des Fahrzeugs nach Erkennen des Einlenkens noch vor der Konfliktzone möglich ist.

Um dies zu prüfen, und ein Fahrverhaltensmodell für Linksabbiegesituationen zu erzeugen wurden Fahrversuche durchgeführt. Dabei wurden von 17 Versuchspersonen die Trajektorien auf einem Kurs mit 7 Linksabbiegevorgängen vermessen. Der Kurs wurde mehrmals durchfahren, so dass insgesamt 308 Abbiegevorgänge zur Verfügung standen. Als Messsystem wurde eine DGPS-gestützte Inertialplattform verwendet, die Messgenauigkeiten im Bereich 1-2 cm ermöglicht. Zusätzlich wurden Fahrzeugdaten wie Beschleunigung, Gaspedalwinkel und Bremsdruck aufgezeichnet. Aufgrund einer hochgenauen Vermessung der Kreuzungen konnten die potentiellen Konfliktzonen festgelegt werden.

Anhand der aufgezeichneten Trajektorien konnte für jeden Abbiegevorgang der Einlenkpunkt (beim Durchfahren) bzw. Haltepunkt (beim Anfahren) automatisiert bestimmt werden. Für die Bestimmung werden verschiedene Fahrzeugparameter (z.B. der Lenkradwinkel) und die Position auf der Kreuzung verwendet. Am Einlenkpunkt kann das System eine Handlung auslösen, wenn Kollisionsgefahr mit einem entgegenkommenden Fahrzeug besteht. Für die Wirksamkeit einer Handlung wurden zwei Varianten untersucht, für die der Anhalteweg, abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit, ab dem Einlenk- bzw. Haltepunkt berechnet wurde. Der Anhalteweg wurde entlang der tatsächlich gefahrenen Trajektorie abgetragen. So wurde für jeden Abbiegevorgang der Punkt bestimmt, an dem das Fahrzeug nach einer Systemhandlung zu Stillstand gekommen wäre. Anschließend wurde die Position der kritischen linken vorderen Fahrzeugecke im Verhältnis zur gedachten Mittellinie der Fahrbahn ausgewertet.

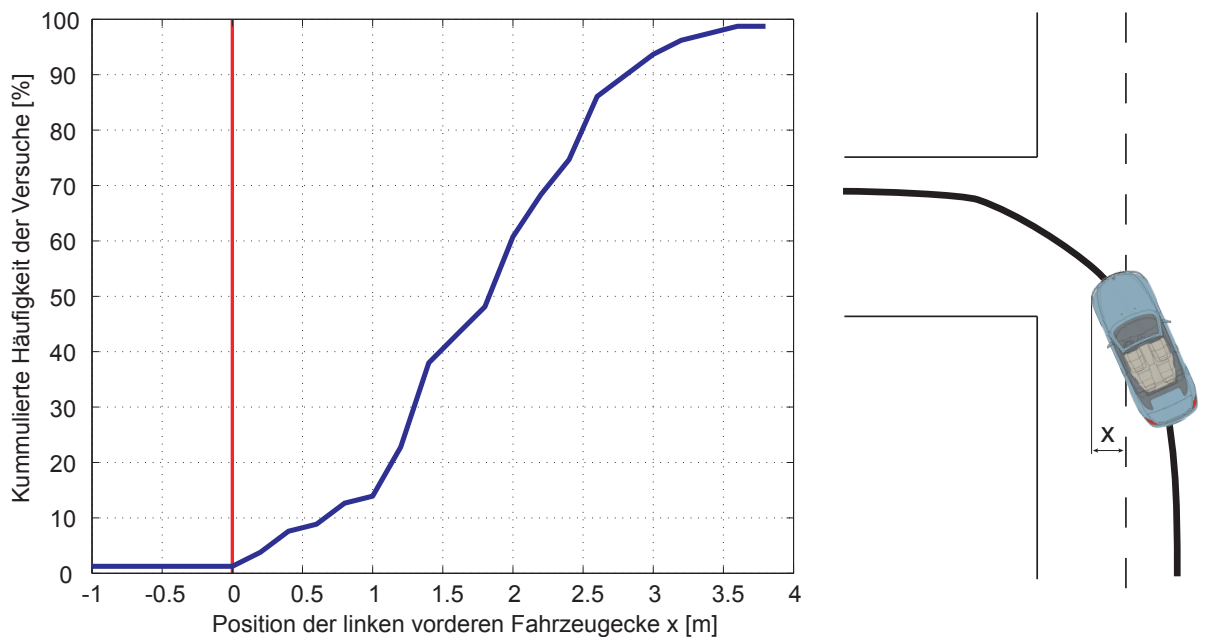


Bild 5: Kumulierte Stop-Positionen im Verhältnis zur Straßenmitte nach Warnung

Bild 5 zeigt die kumulierte Verteilung der Stillstandspositionen in den Durchfahren-Situationen für eine Warnung im Moment des Einlenkpunkts. Dabei wurde angenommen, dass der Fahrer nach einer Reaktionszeit von einer Sekunde mit  $6 \text{ m/s}^2$  bis zum Stillstand verzögert. Negative  $x$ -Werte sind Stillstandspositionen auf der Ausgangs-Fahrbahn des abbiegenden Fahrzeugs, positive  $x$ -Werte sind auf der Gegenverkehrs-Fahrbahn. Die Verteilung zeigt, dass in keinem der Fälle das Fahrzeug so zum Stillstand gekommen wäre, dass sich die linke vordere Fahrzeugecke noch auf der eigenen Fahrbahn befindet. Die durchschnittliche Eindringtiefe in die Gegenverkehrs-Fahrbahn liegt im Bereich um 2 m, d.h., ein Unfall wäre mit einer Warnung in den wenigsten Fällen zu verhindern. Bild 6 zeigt die Verteilung, wenn das System statt einer Warnung eine autonome Notbremsung mit  $6 \text{ m/s}^2$  durchführt. Hier kommt das Fahrzeug in 95% der Fälle so zum Stillstand, dass die kritische Fahrzeugecke nicht weiter als 20 cm in die Gegenverkehrs-Fahrbahn eindringt, ein Unfall also mit hoher Wahrscheinlichkeit verhindert wird.

Aus den Verteilungen ist ersichtlich, dass ein Warnsystem in der Situation Durchfahren kaum wirksam ist, ein autonomes Bremssystem jedoch einen großen Teil der Unfälle verhindern kann. In der Situation Anfahren ist die auf die gezeigte Art abgeschätzte Wirksamkeit eines Warnsystems höher, wenn die Warnung im Moment des Anfahrens erfolgt. Fraglich ist, ob die Reaktionszeit von 1 s in diesem Fall ausreichend hoch bemessen ist. Der Fahrer startet im Moment des Losfahrens ein gut trainiertes Handlungsschema, das er sofort wieder abbrechen müsste. Aus



diesem Grund, und um eine durchgängige Systemhandlung zu erhalten, wurde das System in beiden Situationen, Anfahren und Durchfahren, mit einer autonomen Bremsung implementiert, wobei im Fall Anfahren die Bremsung dazu führt, dass das Fahrzeug festgehalten wird. Gerade bei der autonomen Bremsung im Fall Durchfahren besteht das Risiko einer Gefährdung durch eine mögliche Fehlalarmierung (False-Positive). Deshalb sind die Anforderungen an die nötige Sicherheit der Umgebungserfassung und Situationsinterpretation sehr hoch.

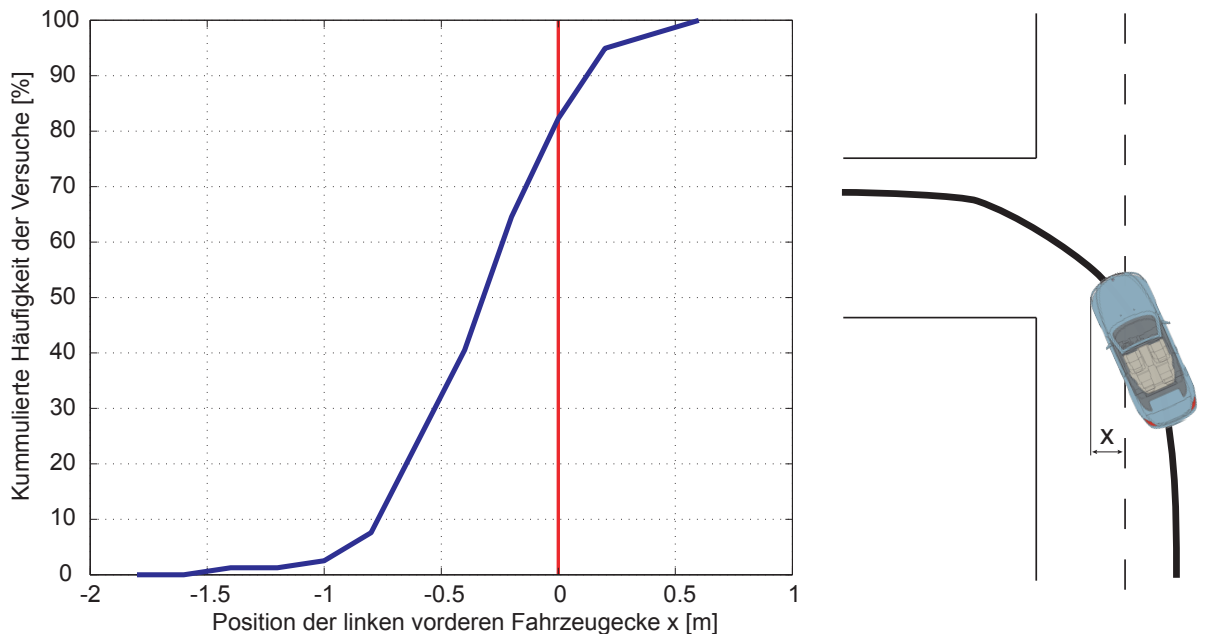


Bild 6: Kumulierte Stop-Positionen im Verhältnis zur Straßenmitte nach autonomer Bremsung

In der Situation Durchfahren können durch eine autonome Bremsung nicht alle Unfälle verhindert werden. Die Gefährlichkeit der Situation Linksabbiegen ist stark vom Fahrerverhalten in Querrichtung abhängig. Ein Eingriff erfolgt aber nur in Längsrichtung, da ein Eingriff in Querrichtung ein sehr großes Risiko darstellt. Lenkt der Fahrer bei relativ hoher Geschwindigkeit unmittelbar sehr schnell ein, ist der Bremsweg zu lang, um das Fahrzeug vor der Konfliktzone zu stoppen, ein potentieller Unfall kann deshalb nicht immer verhindert werden. Die Versuche zeigen aber, dass diese Situation selten ist. Normale Linksabbiegesituationen sind geprägt von knappen Manövern, die im Allgemeinen nicht als kritisch empfunden werden. Eine Systemauslegung mit großen Sicherheitsreserven ist deshalb bei einem Aktiven Sicherheitssystem für Linksabbiegen nicht möglich, da ansonsten die Anzahl der False-Positive-Auslösungen auf ein nicht akzeptables Maß steigt.

## 5 Die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit

Die verhältnismäßig große Freiheit des Fahrers bei der Trajektorienwahl erschwert nicht nur die Entscheidung ob der Fahrer anhalten oder durchfahren will, sie ist auch ein wichtiger Faktor bei der Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit. Die Entscheidung, ob das System eingreift muss in dem Moment fallen, in dem der Fahrer beginnt einzulenken (siehe Kapitel 4). In diesem Moment hat der Fahrer große Freiheiten, wie er die Konfliktzone durchfahren will, sowohl bei seiner Trajektorienwahl, als auch bei seiner Geschwindigkeitswahl. Beide Faktoren, Aufenthaltsort und Aufenthaltsdauer sind in der Situation Linksabbiegen so eng verknüpft, dass eine gemeinsame Betrachtung gewählt wurde. Dafür werden die Trajektorien der Fahrzeuge

nicht mehr in den zwei Dimensionen der Fahrbahnebene, sondern in drei Dimensionen, den beiden der Fahrbahnebene  $x$  und  $y$  und der Zeit  $t$ , betrachtet. Da die Entscheidung über einen Systemeingriff zu einem Zeitpunkt getroffen werden muss, da die 3D-Trajektorie durch die Konfliktzone noch nicht genau bestimmt werden kann, muss sie aufgrund eines Fahrverhaltensmodells angenommen werden. Dieses Fahrverhaltensmodell besteht aus einer Matrix mit drei Dimensionen  $x$ ,  $y$  und  $t$ , in die die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für das abbiegende Fahrzeug eingetragen sind. Jede Matrixzelle entspricht dabei einem Flächenelement auf der Kreuzung (in  $x$  und  $y$ ) in einem Zeitraum (in  $t$ ) und wird als Voxel bezeichnet (von volume element, vgl. [WIKIPEDIA, 2006a]). Der eingetragene Wert entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass dieses Flächenelement in diesem Zeitraum vom Fahrzeug belegt ist. Ist ein Voxel in zwei deckungsgleichen Matrizen für zwei verschiedene Fahrzeuge mit Werten größer Null belegt, besteht eine Kollisionswahrscheinlichkeit. Die Summe aller paarweisen Produkte der Werte aller zusammengehörigen Voxel der Matrizen zweier Fahrzeuge ist ein Maß für die Kollisionswahrscheinlichkeit der beiden Fahrzeuge.

Für die Erzeugung des Fahrverhaltensmodells, also das Belegen der Matrix mit Werten, wurden die beschriebenen Fahrversuche benutzt. Dazu werden die Werte der Voxel erhöht, die bei einem einzelnen Abbiegevorgang durch die aus den Versuchsdaten erzeugten 3D-Trajektorie geschnitten werden. Dabei werden auch die Fahrzeugabmessungen und der Kurswinkel berücksichtigt. Wird dies für alle vorhandenen Abbiegevorgänge durchgeführt, entsteht eine Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung. Die Einzelunfallanalyse zeigt, dass die Wahl eines normalen Fahrverhaltens für die Beurteilung der Kollisionswahrscheinlichkeit berechtigt ist, weil bei einem Großteil der untersuchten Linksabbiegeunfälle kein besonderes Fahrverhalten (etwa überhöhte Geschwindigkeit etc) erkennbar ist. Bild 7 zeigt Die graphische Darstellung des benutzten Fahrverhaltensmodells. In der  $x$ - $y$ -Ebene sind die Umrisse der zugehörigen Kreuzung eingezeichnet.

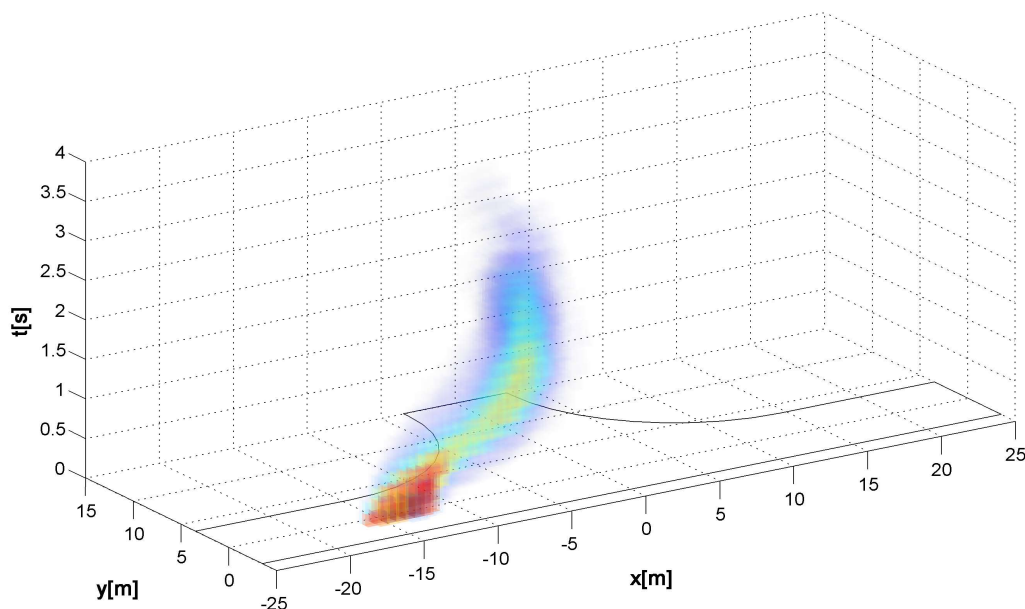


Bild 7: Fahrverhaltensmodell für Linksabbiegesituationen in Form einer 3D-Matrix

Da das Fahrverhalten an unterschiedlichen Kreuzungen nicht identisch ist, wird das Fahrverhaltensmodell, das in einer Referenzkreuzung vorliegt, an die aktuelle Kreuzung angepasst. Dazu werden die einzelnen  $x$ - $y$ -Ebenen der 3D-Matrix mittels einer Morphing-Abbildung [WIKIPE-

DIA, 2006b] verformt. Die Abbildung beruht auf zusammengehörigen Orientierungspunkten in der Referenzkreuzung und in der aktuellen Kreuzung. Die Abbildungsparameter für beliebige Punkte einer Ebene werden durch die Abbildung der Orientierungspunkte von der Referenzkreuzung in die aktuelle Kreuzung festgelegt. Diese Technik ist aus der Computergrafik als Image-Morphing bekannt (vgl. [SCHLICKLING, 2002]). Als Orientierungspunkte sind alle Punkte geeignet, die das Fahrverhalten beeinflussen und automatisiert erfassbar sind, beispielsweise definierte Punkte der Straßenränder.

Nähert sich das Fahrzeug einer Kreuzung, werden die benötigten Orientierungspunkte für die aktuelle Kreuzung bestimmt und das Fahrverhaltensmodell an die aktuelle Kreuzung angepasst. Gleichzeitig werden aus den Daten der Fahrumgebungserfassung Modelle für das Verhalten der Gegenverkehrsfahrzeuge erzeugt. Die Matrix des eigenen Fahrzeugs wird mit den Matrizen der Gegenverkehrsfahrzeuge wie beschrieben verrechnet, wodurch die Kollisionswahrscheinlichkeit bestimmt werden kann.

## 6 Mensch-Maschine-Schnittstelle und Simulatorumsetzung

Für die Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen eignet sich eine Entwicklungskette, mit der Applikationen früh getestet werden können und die von der Verfügbarkeit von Fahrumgebungserfassungssystemen unabhängig ist. Geeignete Werkzeuge sind Simulationsumgebungen in denen mit aufgezeichneten oder künstlich erzeugten Fahrdaten gearbeitet werden kann. Für Tests der gesamten Applikation, der Situationsinterpretation und der Mensch-Maschine-Schnittstelle bietet sich ein Fahrsimulator an. Dies gilt besonders, wenn das Verhalten und die Reaktion des Fahrers für die Wirksamkeit des Systems entscheidend ist.

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle des vorgestellten Systems besteht aus mehreren Teilen. Der wichtigste Teil ist der Eingriff in die autonome Bremsung bei Kollisionsgefahr. Der Fahrer hat die Möglichkeit den Eingriff durch einen Kick-Down am Fahrpedal zu übersteuern, der Eingriff wird dann für die aktuelle Kreuzung deaktiviert.

Ein zweiter Teil ist die Warnung und Information des Fahrers parallel zum autonomen Eingriff. Dabei wird ein Warnton ausgelöst und ein großes Warnsymbol in Head-Up-Display (HUD) eingeblendet (siehe Bild 8). Die gleichzeitige Bremsung des Fahrzeugs wird so für den Fahrer transparent.

Ein dritter Teil ist die Information des Fahrers in der Situation Anfahren. Wartet der Fahrer auf eine geeignete Lücke in einem Strom entgegenkommender Fahrzeuge, wird im HUD ein Informationssymbol eingeblendet, wenn das System beim Anfahren eingreifen würde.



Bild 8: Warnsymbol im Head-Up-Display bei Systemeingriff

Für die Umsetzung des Linksabbiegeassistenten im Fahrsimulator wurde eine Fahrumgebungserfassung entwickelt, die für die aktuelle Kreuzung aus den Simulator-Logikdaten die Orientierungspunkte für das Fahrverhaltensmodell extrahiert und die relevanten Fremdfahrzeuge

auswählt. Für die Mensch-Maschine-Schnittstelle kann ein virtuelles HUD im Simulatorbild erzeugt werden. Das System wurde mit der Simulationssoftware MatLab-Simulink entwickelt und mittels Real-Time-Workshop in die Simulationssoftware eingebunden.

In ersten Vorversuchen konnten die Annahmen zur Wirksamkeit des Linksabbiegeassistenten bekräftigt werden.

## **7 Ausblick**

Das Beispiel des Linksabbiegeassistenten zeigt, dass die Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen mit Top-Down-Vorgehensweise vorteilhaft ist. Wichtig dabei ist, dass während der Entwicklung auftauchende Fragen oft aufgrund der durchgeführten Unfallanalyse beantwortet werden können.

Das entwickelte prototypische Linksabbiegeassistenzsystem zeigt auch, dass die Ansprüche an die Fahrumgebungserfassung bei Aktiven Sicherheitssystemen für Linksabbiegesituationen sehr hoch sind. Dies gilt sowohl für die Menge und Genauigkeit der benötigten Information, als auch für die Sicherheit, die bei der Entscheidung vorliegen muss, da der benötigte autonome Bremseneingriff ein hohes Risiko darstellt.

## **Literatur**

DONGES, E.:

Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug.

Zeitschrift für Verkehrssicherheit 24 (1978), S. 98-112.

EHRENSPIEL, K., LINDEMANN, U., KIEWERT, A.:

Kostengünstig entwickeln und konstruieren.

Berlin: Springer 2000.

ELLINGHAUS, D., STEINBRECHER J.:

Fahren auf Landstraßen. Traum oder Alptraum?

Uniroyal-Verkehrsuntersuchung 28, Köln/Hannover 2004 [entnommen am 06.03.2006, URL. [http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/uniroyal/automobil/themen/enjoyhzweio/verkehrsuntersuchung/archiv/download/verkehrsuntersuchung28\\_de.pdf](http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/uniroyal/automobil/themen/enjoyhzweio/verkehrsuntersuchung/archiv/download/verkehrsuntersuchung28_de.pdf)]

GIDAS

GIDAS – German In-Depth Accident Study

[entnommen am 06.03.2006, URL: <http://www.gidas.org/>]

KOCHERSCHIED, H.:

Wege zur Effizienzbetrachtung von Fahrerassistenzsystemen. In: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, TÜV-Süd, 2004.

MEITINGER, K.-H., EHMANNS, D., HEISSING, B.:

Systematische Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen. Beispiel Stop-Schild-Warnung. In: Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Wolfsburg Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004, S. 145-158. (VDI-Berichte 1864)

SCHLICKLING. MARC:

Warping eines Bildes/Pixels - Field Morphing.

Proseminararbeit im Rahmen des Proseminars „Visualisierung und Animation von Algorithmen aus der Computergrafik“, Universität des Saarlandes, 2002. [entnommen am 29.12.2003, URL: [http://www.marc-schlickling.de/downloads/WeBP\\_FM.pdf](http://www.marc-schlickling.de/downloads/WeBP_FM.pdf)]

STATISTISCHES BUNDESAMT:

Verkehrsunfälle 2001

Stuttgart: Metzler-Poeschel, 2002.

WIKIPEDIA (2006A)

Voxel – Wikipedia

[entnommen am 02.03.2006, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Voxel>]

WIKIPEDIA (2006B)

Morphing – Wikipedia, the free encyclopedia

[entnommen am 2.3.2006, URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Morphing>]