

Institut für Maschinentechnik - Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
der
Technischen Universität München

Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen

Karl-Heinz Meitinger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Wachtmeister

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Heißing
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lohmann

Die Dissertation wurde am 3.7.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.11.2008 angenommen.

Diese Arbeit ist auch erschienen im VDI Verlag:

MEITINGER, K.-H.:

Top-Dow-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009. (Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 701)

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meinen Tätigkeiten als Doktorand bei der BMW Forschung und Technik und als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. B. Heißing. Das große Vertrauen, das er Mitarbeitern und Assistenten entgegenbringt, hat entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Für die Übernahme des Koreferats bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. B. Lohmann, für den Prüfungsvorsitz bei Prof. Dr.-Ing. G. Wachtmeister.

Weiter möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. R. Freymann, Dr.-Ing. D. Wisselmann und Dr. rer. nat. Helmut Spannheimer bedanken, die die Durchführung des Projekts bei der BMW Forschung und Technik GmbH ermöglichten. Ein ganz herzliches Dankeschön geht an Dr.-Ing. Dirk Ehmanns für die Betreuung bei der BMW Forschung und Technik.

Viele Kollegen bei BMW haben mich während dieser Arbeit unterstützt. Hier möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. Alfred Pruckner, Dr. rer. nat. Peter Zahn, Peter Waldmann, Felix Klanner und Verena Broy sowie bei meinen Diplomanden Franz Bernt und Nicola Corino bedanken.

Eine wunderbare Erfahrung war die Atmosphäre und die Kollegialität am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Ein besonderer Dank hierfür an alle Kollegen, speziell an Dr.-Ing. Jürgen Negele, Dr.-Ing. Carmen Theimert, Dr.-Ing. Frank Diermeyer, Holger Mohra, Britta Michel sowie an Gabi Weigand. Vielen Dank an dieser Stelle auch an Dr.-Ing. Fink für die hervorragende inhaltliche Betreuung und Unterstützung dieser Arbeit.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben außerdem Tina Huber und Christoph Birkhold sowie besonders Lenka Horáčková beigetragen. Vielen herzlichen Dank dafür!

Nicht zuletzt gilt mein Dank meinen Eltern für die jederzeitige großartige Unterstützung sowie meiner Freundin Felicitas, die mir immer mit viel Verständnis und Geduld zur Seite stand.

INHALT

1	Einleitung und Stand der Technik	1
1.1	Motivation, Begriffsklärung und Ziel der Arbeit	1
1.2	Überblick Aktive Sicherheitssysteme und Fahrerassistenzsysteme	2
1.2.1	Stabilitätssysteme	2
1.2.2	Abstandregel- und Notbremssysteme	4
1.2.3	Querführungssysteme	4
2	Entwicklungsmethode „Top-Down“	6
2.1	Entwicklungsmethode V-Modell in der Automobilindustrie	6
2.2	Besonderheiten bei der Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen	8
2.2.1	Anforderungen an Aktive Sicherheitssysteme	8
2.2.2	Kritische Punkte bei der Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen	9
2.3	Bottom-Up-Methode	14
2.4	Top-Down-Methode	15
2.5	Entwicklungsprozess für Aktive Sicherheitssysteme mit Top-Down-Orientierung	16
2.6	Entwicklungswerkzeug Fahrsimulation	17
3	Unfallanalyse	19
3.1	Die Unfallanalyse in der Top-Down-Entwicklung	19
3.2	Verfahren zur Unfallanalyse	19
3.2.1	Expertenbefragung und Umfragen	20
3.2.2	Theoretische Überlegungen	21
3.2.3	Unfallerbhebungen und Unfallstatistik	22
3.2.4	Einzelunfallanalyse	29
3.3	Auswahl relevanter Situationen	34
4	Die Stop-Schild-Assistenz	37
4.1	Unfalltyp und Systemdefinition	37

4.1.1 Unfalltyp	37
4.1.2 Systemdefinition und Funktionsweise	38
4.1.3 Machbarkeitsüberlegung	38
4.2 Situationsinterpretation	39
4.2.1 Warndilemma	39
4.2.2 Vorversuche zur Fahrerverhaltensanalyse	42
4.2.3 Fahrerverhaltensanalyse mit analytischer Lösung	45
4.2.4 Fahrerverhaltensanalyse mit Neuronalem Netz	47
4.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle	50
4.4 Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung	52
4.4.1 Sicherheit der Erfassung	53
4.4.2 Qualität der Erfassung	53
4.4.3 Reichweite der Erfassung	56
4.4.4 Mögliche Erfassungsmethoden	56
4.5 Systemumsetzung und Test	59
4.5.1 Umsetzung und Test im Simulator	59
4.5.2 Umsetzung und Test im Fahrzeug	65
5 Linksabbiegeassistenz	67
5.1 Unfalltyp und Systemdefinition	67
5.1.1 Unfalltyp	67
5.1.2 Untertypen	67
5.1.3 Systemdefinition und Abgrenzung	68
5.1.4 Machbarkeitsüberlegung	69
5.2 Systemaufbau	69
5.3 Abbiegeabsicht	70
5.3.1 Fahrversuche zur Fahrerverhaltensanalyse	70
5.3.2 Der richtige Handlungspunkt und der richtige Handlungsgrad	71
5.3.3 Beginn des Abbiegevorgangs	74
5.3.4 Anhalteabsicht	84

	<i>Inhalt</i>
5.3.5 Anfahrabsicht	84
5.3.6 Qualität der Erkennung der Abbiegeabsicht	87
5.4 Kollisionswahrscheinlichkeit	88
5.4.1 Problemstellung	88
5.4.2 3D-Fahrerverhaltensmodell und 3D-Kollisionsbetrachtung	89
5.4.3 Erzeugen und Anpassen des Modells	94
5.4.4 Erzeugen des Gegenverkehrsmodells	103
5.4.5 Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit	103
5.4.6 Weitere Modelloptimierung	107
5.5 Mensch-Maschine-Schnittstelle	111
5.6 Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung	112
5.6.1 Umfang der Erfassung	112
5.6.2 Sicherheit der Erfassung	114
5.6.3 Qualität der Erfassung	114
5.6.4 Mögliche Erfassungsmethoden	115
5.7 Systemumsetzung und Test	116
5.7.1 Implementierung in Matlab-Simulink	116
5.7.2 Aufbau des Simulatorversuchs	117
5.7.3 Versuchsergebnisse	118
6 Zusammenfassung und Ausblick	121
6.1 Zusammenfassung	121
6.2 Ausblick	122
Literaturverzeichnis	125

FORMELZEICHEN

δ		Lenkradwinkel
$\dot{\delta}$	1/s	Lenkradwinkelgeschwindigkeit
$\ddot{\delta}$	1/s ²	Lenkradwinkelbeschleunigung
η		Wirksamkeit eines Aktiven Sicherheitssystems
φ		Kurswinkel des Fahrzeugs
ω_i		Gewichtung einer Einzelverschiebung durch ein Orientierungslinienpaar
a_b	m/s ²	konstante Bremsverzögerung
a_{bk}	m/s ²	konstante Bremsverzögerung bei einer Komfortbremsung
a_{ego}	m/s ²	Beschleunigung des eigenen Fahrzeugs
$a_{schlepp}$	m/s ²	Beschleunigung durch Schleppmoment
d_{lv}	m	laterale Position der linken vorderen Fahrzeugecke
d_K	m	Entfernung von der Kreuzung
d_{stop}	m	Entfernung von der Haltelinie
e_{FP}		zu erwartende Rate von Fale-Positive-Auslösungen
$e_{Geg,v}$	m/s	direkter Fehler der Geschwindigkeitserfassung
$e_{Geg,y}$	m	direkter Fehler der Positionserfassung
$e_{Mess,Geg,y}$	m	Fehler der Vorausberechnung der Gegenverkehrsposition durch Messfehler
$e_{Vor,Geg,y}$	m	Fehler der Gegenverkehrsposition aufgrund nicht vorhersagbaren Verhaltens
$l_{Vt,o}$	s	ursprüngliche Zeitausdehnung eines Voxels
l_{Vy}	m	Abmessung eines Voxels in x-Richtung
l_{Vx}	m	Abmessung eines Voxels in y-Richtung
l_{Vt}	s	Zeitausdehnung eines Voxels

m_t		Streckfaktor zum Ausgleich der Geschwindigkeitseinflüsse
n_{erf}		Anzahl der zu erfassenden Fahrzeuge
n_O	1/km	Anzahl der Unfallopfer pro Personenkilometer
p_{ego}		Wahrscheinlichkeit, dass ein Voxel belegt ist
p_{koll}		Kollisionswahrscheinlichkeit
r_K	m	charakteristischer Radius der Kreuzung
s_a	m	Anhalteweg
s_b	m	Bremsweg
s_r	m	Reaktionsweg
t_a	s	angepasster t-Wert eines Trajektorienpunkts
t_d	s	durchschnittliche Abbiegedauer
t_{erf}	s	Erfassungsdauer für entgegenkommende Fahrzeuge
t_{max}	s	maximaler Zeitbedarf für das Abbiegen
t_o	s	ursprünglicher t-Wert eines Trajektorienpunkts
t_r	s	Reaktionszeit
u		Teilungsverhältnis der Orientierungslinie durch das Lot von einem Punkt
v	m	Abstand eines Punktes von der Orientierungslinie
v_{ego}	m/s	Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs
v_{Geg}	m/s	Geschwindigkeit des Gegenverkehrs
v_e	m/s	Eintrittsgeschwindigkeit in den Voxel-Raum
v_n	m/s	Norm-Eintrittsgeschwindigkeit in den Voxel-Raum
x_s	m	konstante Verschiebung der Haltelinie
D_i		Verschiebung eines Punktes durch ein Orientierungslinienpaar
G		Gaspedalstellung

N		absolute Anzahl von Unfällen
N_e		Anzahl der relevanten Situationen
N_i		Anzahl der Situationen mit erfolgreichem Systemeingriff
N_O		absolute Anzahl von Unfallopfern
N_R		Anzahl zusätzlicher Unfälle durch ein System
P_Q		Startpunkt der Orientierungslinie im Quellbild
P_Z		Startpunkt der Orientierungslinie im Zwischenbild
R_s	m	Erfassungsreichweite
S_Q		Vektor der Orientierungslinie im Quellbild
S_Z		Vektor der Orientierungslinie im Zwischenbild
X_Q		Punkt im Quellbild
X_Z		Punkt im Zwischenbild

KURZFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird eine top-down-orientierte Methode zur Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen vorgestellt. Anhand dieser Methode wird eine Analyse des Unfallgeschehens durchgeführt und es werden zwei prototypische Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen entwickelt, ein Stop-Schild-Assistent und eine Linksabbiegeassistentz.

Der Stop-Schild-Assistent verhindert einen Unfalltyp, bei dem die Unfallverursacher ungebremst über eine Kreuzung mit Stop-Schild fahren, weil ihnen nicht bewusst ist, dass sie nicht vorfahrtsberechtigt sind. Der Stop-Schild-Assistent erkennt aus dem Annäherungsverhalten, ob der Fahrer das Stop-Schild erkannt hat und warnt im Fehlerfall zu einem Zeitpunkt, an dem der Fahrer das Fahrzeug noch vor der Stop-Linie anhalten kann. Versuche im Fahrsimulator und im Versuchsfahrzeug bestätigen die Wirksamkeit der Warnung und die geringe Fehlerrate der Situationsanalyse.

Die Linksabbiegeassistentz verhindert Unfälle, bei denen ein links abbiegendes Fahrzeug mit einem entgegenkommenden Fahrzeug zusammenstößt. Die Situationsanalyse der Linksabbiegeassistentz ist in zwei Bereiche unterteilt, das Erkennen der unmittelbaren Abbiegeabsicht und die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit. Bei erkannter Abbiegeabsicht und hoher Kollisionswahrscheinlichkeit wird das Fahrzeug autonom gebremst. Aus den Ergebnissen von Fahrversuchen wird gezeigt, dass ein zuverlässiges Erkennen der Abbiegeabsicht erst zu einem Zeitpunkt möglich ist, an dem eine Warnung nicht wirksam ist. Die Wirksamkeit einer autonomen Bremsung wird durch die Versuche bestätigt. Für die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit wird ein 3D-Fahrerverhaltensmodell vorgestellt, das örtliche und zeitliche Aufenthaltswahrscheinlichkeit sowie die Fahrzeugabmessungen berücksichtigt. Zum Anpassen des Modells an die aktuellen örtlichen Gegebenheiten der Kreuzung wird ein Morphing-Verfahren benutzt.

In Vorversuchen wird die Linksabbiegeassistentz im Simulator getestet, aus den Ergebnissen werden Empfehlungen für zukünftige Versuche abgeleitet.

1 Einleitung und Stand der Technik

1.1 Motivation, Begriffsklärung und Ziel der Arbeit

Individuelle Mobilität ist eine der wesentlichen Säulen der modernen westlichen Gesellschaft. Im Zentrum dieser Mobilität steht das Automobil, das sowohl praktische Gesichtspunkte erfüllt als auch den Wunsch nach Freiheit, Individualität und Prestige verkörpert. Der Preis für die individuelle Mobilität per Automobil ist jedoch hoch. Im Jahr 2000 verloren mehr als 41000 Menschen in der Europäischen Union bei Straßenverkehrsunfällen ihr Leben, mehr als 1,7 Millionen wurden verletzt [AMT FÜR AMTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2001, S. 78]. Trotz einer Abnahme der Todesfälle im Straßenverkehr zwischen 1970 und 2000 um 48% sind Verkehrsunfälle bei unter 45-Jährigen weiterhin die wichtigste Todesursache [AMT FÜR AMTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2003, S. 109].

Die Europäische Union hat sich in ihrem „Weißbuch Verkehrspolitik“ bis 2010 [AMT FÜR AMTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2001, S. 77] das Ziel gesetzt, die Zahl der Getöteten im Straßenverkehr in Europa zwischen 2000 und 2010 um weitere 50% zu reduzieren. Neben Verbesserungen der passiven Fahrzeugsicherheit, der Unfallmelde- und Rettungssysteme sowie Maßnahmen bei der baulichen Gestaltung von Verkehrswegen soll ein wesentlicher Teil der Reduzierung durch Maßnahmen im Rahmen der Aktiven Sicherheit erreicht werden.

Der Begriff „Aktive Sicherheit“ umfasst alle Einrichtungen und Maßnahmen eines Straßenfahrzeugs, zur Verhinderung von Unfällen, dazu gehört die Verbesserung klassischer mechanischer Systeme des Fahrzeugs wie Fahrwerk, Bremsen und Reifen. Durch den rapiden Zuwachs der Möglichkeiten elektronischer und mechatronischer Systeme und gleichzeitig sinkenden Preisen können zunehmend auch Fahrerassistenzsysteme im Bereich Aktiver Sicherheit eingesetzt werden. Fahrerassistenzsysteme sind elektronische und mechatronische Systeme, die den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen oder Teilaufgaben übernehmen. Ziele von Fahrerassistenzsystemen nach NEUNZIG [2004, S. 21] sind:

- Erhöhen des Fahrkomforts und Entlasten des Fahrers
- Verbesserung der Verkehrseffizienz
- Verringern der Umweltwirkungen des Verkehrs
- Erhöhen der Sicherheit

Fahrerassistenzsysteme, die vor allem dazu dienen, die Verkehrssicherheit zu erhöhen, werden als „Aktive Sicherheitssysteme“ bezeichnet. Der Übergang von Aktiven Sicherheitssystemen zu Passiven Sicherheitssystemen ist fließend. Sicherheitssysteme, die einen Unfall nicht vollständig verhindern sollen, sondern die Kollisionsschwere mildern, werden als „Collision-Mitigation-Systeme“ und solche, die in einer kritischen Fahrsituation Maßnahmen zum Schutz der Insassen

einleiten, als „Pre-Crash-Systeme“ bezeichnet. Dabei werden Collision-Mitigation-Systeme eher den Aktiven Sicherheitssystemen, Pre-Crash-Systeme eher der passiven Sicherheit zugeordnet.

Aktive Sicherheitssysteme, die gegen den häufigsten tödlichen Unfalltyp, den Alleinunfall, wirken, sind heute in allen Fahrzeugklassen verfügbar und auf dem Weg zur Standardausstattung in allen Fahrzeugklassen. Eine ähnliche Entwicklung ist in den nächsten Jahren bei Aktiven Sicherheitssystemen, die gegen Unfälle im Längsverkehr wirken, abzusehen (siehe 1.2.2). Sollen die Unfallzahlen mittel- bis langfristig weiter gesenkt werden, sind Aktive Sicherheitssysteme für den dritten Unfallschwerpunkt Kreuzungsunfälle (siehe 3.2.3.1) notwendig. Die Situationen, die ein Aktives Sicherheitssystem für Kreuzungen handhaben muss, sind jedoch um ein vielfaches komplexer und vielfältiger als die Situationen im Längsverkehr, womit fraglich ist, ob Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen überhaupt darstellbar sind.

In dieser Arbeit wird ein top-down-orientierter Entwicklungsprozess vorgestellt, der es ermöglicht, trotz der hohen Anzahl denkbarer Situationen an Kreuzungen, diejenigen auszuwählen, die für Aktive Sicherheitssysteme relevant und geeignet sind. Die Aktiven Sicherheitssysteme lassen sich dann auf die entsprechenden Situationen maßschneidern, was einen hohen Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit garantiert, aber gleichzeitig die Komplexität der Systeme auf ein vertretbares Maß reduziert.

Es werden zwei Beispiele gezeigt, die mit der genannten Methode entwickelt wurden, ein Aktives Sicherheitssystem, das vor dem versehentlichen Überfahren von Stop-Schildern schützt (Kapitel 4) und ein Aktives Sicherheitssystem, das links abbiegende Fahrzeuge vor einem Zusammenstoß mit entgegenkommenden Fahrzeugen schützt (Kapitel 5).

1.2 Überblick Aktive Sicherheitssysteme und Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme und Aktive Sicherheitssysteme sind nach vielfältigen Kriterien unterscheidbar und einteilbar, wie beispielsweise nach Aufgabe der Fahrzeugführung, nach Systemkonzept, oder nach Assistenzstrategie. WILTSCHKO [2004, S. 37ff] beschreibt einen Ansatz zur systematischen Einteilung von Fahrerassistenzsystemen. Im folgenden Überblick sind die Systeme nach vom Kunden erlebten Funktionsklassen geordnet, wobei von bereits am Markt verfügbaren Systemen ausgegangen wird.

1.2.1 Stabilitätssysteme

Die Einführung des ersten Stabilisierungssystems, des Antiblockiersystems ABS im Jahr 1978 [BOSCH 2007] war gleichzeitig der erste Einsatz eines mechatronischen Aktiven Sicherheitssystems in PKWs. ABS stabilisiert das Fahrzeug in Bremssituationen, indem ein Blockieren der Räder verhindert wird und die Seitenführung erhalten bleibt. Wesentliche Komponenten sind die Raddrehzahlsensoren und als Aktor ein Hydroaggregat mit Magnetventilen [ISERMANN 2006, S. 139], das erlaubt, den vom Fahrer vorgegebenen Bremsdruck radindividuell zu reduzieren.

Das 1995 eingeführte Elektronische Stabilitäts-Programm ESP (oder auch DSC) stabilisiert das Fahrzeug in allen Fahrsituationen. Aus der Fahrereingabe (Lenkwinkel und Geschwindigkeit des Fahrzeugs) wird durch ein Fahrzeugmodell ein Sollverhalten berechnet und mit dem Istverhalten verglichen. Die Größen des Istverhaltens werden gemessen (z.B. Giergeschwindigkeit und Querschleunigung) oder durch einen Beobachter geschätzt (z.B. Schwimmwinkel und Reifenschräglaufwinkel) [ISERMANN 2006 S. 176F]. Weicht das Istverhalten in einer instabilen Fahrsituation vom Sollverhalten ab, wird ein Fahrzeugregler aktiviert, der durch autonomes Abbremsen einzelner Räder ein Giermoment erzeugt, das das Fahrzeug stabilisiert.

Während der Mensch aufgrund seiner limitierten Fähigkeiten bei der Informationsverarbeitung beim Ausregeln von Gierstörungen auf 0,4 bis 2 Hz, je nach zu verarbeitender Informationsmenge, beschränkt ist [HEISSING 2005, S. 1-23], kann ein ESP-System auch höherfrequente Störungen kompensieren (siehe Bild 1-1).

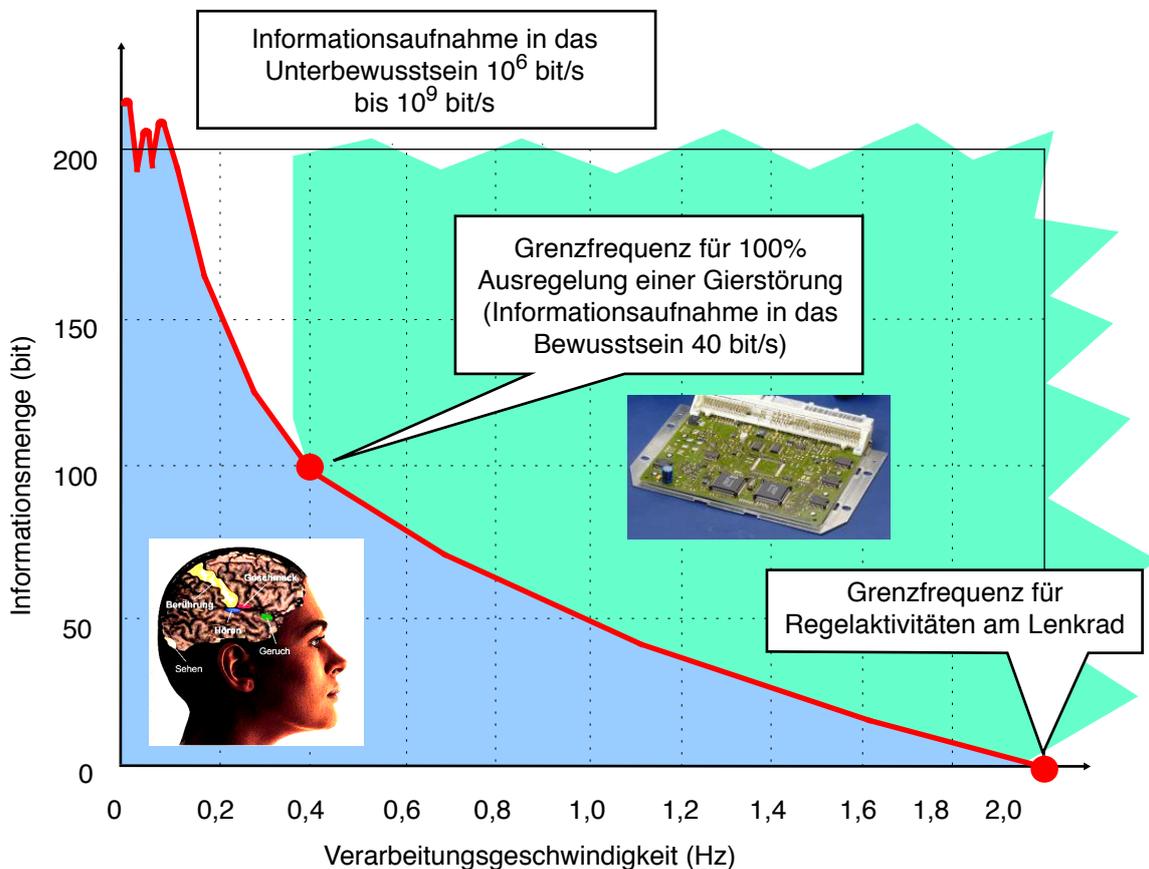


Bild 1-1: Grenze der Informationsverarbeitung des Menschen bei der Fahrzeugführung (nach HEISSING [2005, S. 1-23])

Die Stabilisierung von Fahrzeugen ist eine wirkungsvolle Maßnahme der Aktiven Sicherheit. Bei einem Vergleich von Mercedes Fahrzeugen mit ESP und ohne ESP zeigt sich eine Reduktion der Fahrunfälle, dem dem häufigsten Unfalltyp bei Unfällen mit Getöteten, um über 42 % [WEBER 2004]. Verschiedene weitere Studien, z.B. TINGVALL ET. AL. [2003, S.4] zeigen vergleichbare Ergebnisse.

1.2.2 Abstandregel- und Notbremssysteme

Das erste radarbasierte Abstandregelsystem wurde 1998 in der Mercedes S-Klasse unter dem Namen „DISTRONIC“ eingeführt [DAIMLERCHRYSLER 2007]. Heute sind Abstandregelsysteme von vielen Automobilherstellern verfügbar. Allgemein hat sich die Bezeichnung Adaptive Cruise Control (ACC) durchgesetzt. Durch einen RADAR (Radiowave Detection And Ranging) oder LIDAR-Sensor (Light Detection And Ranging) in der Fahrzeugfront wird der Abstand (beim RADAR auch die Geschwindigkeit) von vorausfahrenden Fahrzeugen gemessen und auf einen Soll-Abstand eingeregelt. Bei freier Fahrbahn wird die vom Fahrer vorgegebene Wunschgeschwindigkeit eingeregelt. Bei Annäherung an ein langsames Fahrzeug sind viele ACC-Systeme in der Lage, das eigene Fahrzeug durch einen Bremsenriff zu verzögern, wobei die maximale Verzögerung meist auf etwa 3 m/s^2 beschränkt ist, um die Auswirkungen von fehlerhaften Detektionen zu begrenzen.

Bisherige ACC-Systeme sind reine Komfortsysteme, die dem Fahrer ermöglichen, die Geschwindigkeitsregelung weitgehend vom Fahrzeug durchführen zu lassen. In neueren Systemen werden sowohl der Geschwindigkeitsbereich bis zum Stillstand erweitert als auch die maximalen Verzögerungen erhöht.

Zusätzlich kommunizieren neueste ACC-Systeme (z.B. die DISTRONICPLUS von Daimler-Chrysler) mit dem Bremsassistenten (BAS). Der Bremsassistent löst hier nicht nur bei schneller Pedalbetätigung aus sondern auch bei kritischer Annäherung an ein Fahrzeug und Pedalberührung.

Die Verknüpfung der aus den ACC-Systemen benutzten Sensoren und Auswertelgorithmen mit Warnungen sowie aktiven oder unterstützenden Bremsenriffen erweitert das Einsatzspektrum des ACC auf Sicherheitsfunktionen. Dabei sind verschiedene Varianten und Ausprägungen der Sicherheitsfunktionen denkbar. ZOBEL [2006, S. 1737] zeigt, dass das Potential unterstützender und automatischer Notbremssysteme sehr hoch ist, da in weniger als 10 % der Unfälle von den beteiligten Fahrern vor dem Unfall eine Bremsung mit voller Verzögerung eingeleitet wird.

Bedingung für die Einführung von Notbremssystemen ist eine hohe funktionale Sicherheit, besonders die Sicherheit vor Fehlauflösungen, da diese kritische Situationen erst verursachen können.

1.2.3 Querführungssysteme

Querführungssysteme (oft als Heading Control, HC, bezeichnet) unterstützen den Fahrer bei der Spurhaltung. Dabei wird zwischen zwei Varianten unterschieden [KÖLBL & ZAHN 2006, S. 890]:

- Spurverlassenswarnung
- Spurführung

Bei der Spurführung übernimmt das Assistenzsystem die Querführung des Fahrzeugs. Dabei sind verschiedene Ausprägungen möglich:

- Unterstützende Spurführung:
Die Spurführung wird nur aktiviert, wenn der Fahrer die Hände am Lenkrad hat. Das maximale Lenkmoment ist begrenzt, so dass der Fahrer jederzeit die Empfehlung des Querführungssystems übersteuern kann.

- Automatische Spurführung:

Die Spurführung kann unabhängig vom Fahrer aktiviert werden. Das Fahrzeug übernimmt die Querführung auf einer Spur vollständig. Auch hier sind die Lenkmomente auf Werte beschränkt, die jederzeit übersteuert werden können.

Spurführungssysteme benötigen eine Videosensorik, die mit Hilfe einer Bildverarbeitung und Datenauswertung die Fahrspur und die Position des Fahrzeugs in der Spur erfassen kann. Eine solche Fahrumgebungserfassung unterliegt bei ungünstigen Umgebungsbedingungen wie verschmutzten Straßen, Schnee, starkem Gegenlicht oder Hell-Dunkel-Übergängen Einschränkungen, weshalb Querführungssysteme hier nur bedingt einsetzbar sind.

Bei der Spurverlassenswarnung bleibt die Querführung in der Hand des Fahrers. Überfährt der Fahrer unbeabsichtigt eine Fahrspurmarkierung, wird er durch ein Tonsignal oder eine haptische Rückmeldung am Lenkrad oder am Sitz gewarnt. Einfachere Systeme warnen erst bei tatsächlichem Überfahren der Spur, benötigen aber nur preiswerte Infrarot-Sensorik [CITROËN 2007], vorausschauende schon vor dem Überqueren der Spurmarkierung. Bei vorausschauenden Systemen sind die Sensorikanforderungen denen der Spurführungssysteme vergleichbar. Die Begrenzung auf einen engen Geschwindigkeitsbereich, z.B. auf über 60 km/h beim MAN Lane-Guard [MAN NUTZFAHRZEUGE AG 2004], erhöht die Funktionssicherheit.

Spurführungssysteme sind Komfortsysteme, die dem Fahrer die Regelaufgabe der Spurführung erleichtern oder abnehmen. Während der Einsatz sich bisher auf die Führung in einer Spur beschränkt, stellen KÖLBL & ZAHN [2006, S. 892^{FF}] ein integriertes Längs- und Querführungssystem vor, das den Fahrer auch während Spurwechselforgängen unterstützt.

Systeme zur Spurverlassenswarnung sind Aktive Sicherheitssysteme. In Zukunft ist eine Kombination von Querführungssystemen mit Stabilisierungssystemen denkbar (z.B. [SCHUTZRECHT EP 1556264 B1]). Damit kann beispielsweise der Zielkonflikt zwischen Erhöhen der erreichbaren Querbeschleunigung und Verringern des Schwimmwinkels beim DSC/ESP mit Hilfe der Information aus dem Querführungssystem situationsgerecht aufgelöst werden.

2 Entwicklungsmethode „Top-Down“

2.1 Entwicklungsmethode V-Modell in der Automobilindustrie

Das Automobil ist das technisch komplexeste Konsumprodukt. In den letzten Jahrzehnten hat es sich zudem vom mechanischen zu einem mechatronischen Produkt gewandelt. Die vielfältigen, teils konträren Anforderungen an ein neues Automobil sind ohne moderne Entwicklungs- und Produktentstehungsprozesse nicht mehr erfüllbar.

Als ein wesentliches Basismodell der mechatronischen Systeme in der Fahrzeugentwicklung hat sich das V-Modell (siehe Bild 2-1) durchgesetzt. Es stammt ursprünglich aus dem Bereich der militärischen Softwareentwicklung [WIKIPEDIA 2006B] und ist in seiner jüngsten Weiterentwicklung, V-Modell XT, ein Software-Entwicklungsmodell, das an Software-Projekte verschiedener Größenordnung angepasst werden kann.

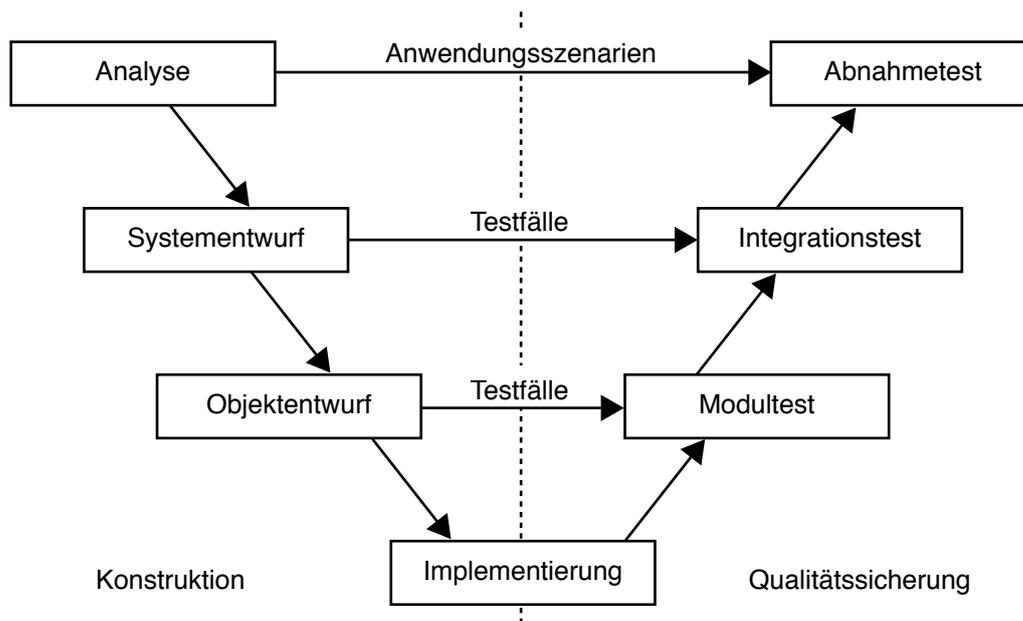


Bild 2-1: V-Modell 97 für Software-Entwicklung (nach [SCHILLER 2006, KAP. 3, S. 166])

Da die Software bei mechatronischen Systemen allgemein und auch im Automobil eine zunehmende Rolle spielt [SCHÄUFFELE, ZURAWKA 2004, S. 19], wird das V-Modell in angepasster Form für den gesamten mechatronischen Entwicklungsprozess benutzt (z.B. bei MARTINUS [2005 S. 68] oder ISERMANN [2006 S. 15]). Im V-Modell sind die wesentlichen Elemente der Entwicklung mechatronischer Systeme abgebildet (siehe Bild 2-2):

- Partitionierung:
Teilen des Entwicklungsproblems in Teilprobleme im linken Ast des V; entspricht der Konstruktion in der Software-Entwicklung

2.2 Besonderheiten bei der Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen

2.2.1 Anforderungen an Aktive Sicherheitssysteme

Die Anforderungen an Aktive Sicherheitssysteme entstammen drei unterschiedlichen Quellen, dem Kunden, dem Fahrzeughersteller und der öffentlichen Hand.

Die unterschiedlichen Interessen dieser drei Domänen führen zu Anforderungen, die sich zum Teil widersprechen (siehe Bild 2-3).

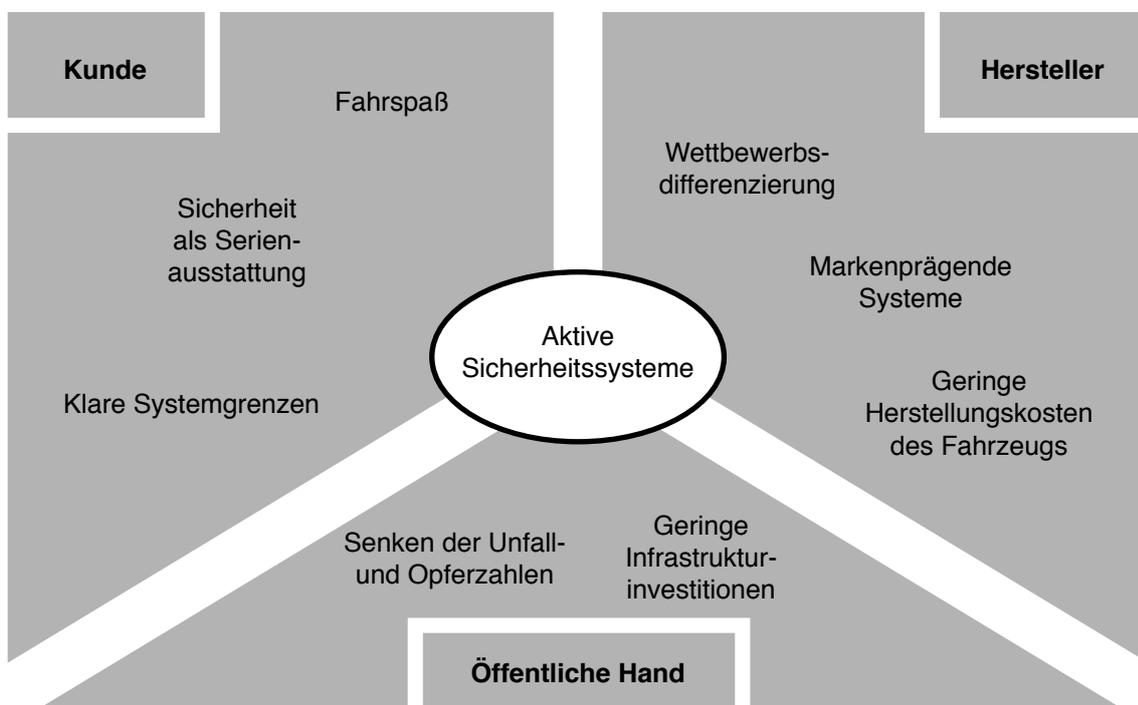


Bild 2-3: Beispiele von Anforderungen an Aktive Sicherheitssysteme aus unterschiedlicher Herkunft.

Im Folgenden sollen die Anforderungen genauer erläutert werden.

Anforderungen des Kunden:

- **Fahrspaß:**
Aktive Sicherheitssysteme sollen das Fahrerlebnis nicht negativ beeinflussen. Dies bedeutet vor allem, dass bei normaler oder auch bei sportlicherer Fahrweise keinerlei Aktion eines Aktiven Sicherheitssystems auftritt, die den Fahrer stört oder belastet.
- **Sicherheit als Serienausstattung:**
Verschiedene Studien (z.B. SPIEGEL INSTITUT [2003, S. 37]) zeigen, dass sich die über-

wiegende Mehrheit der Autofahrer Sicherheitssysteme, gleich ob aktiv oder passiv, als Serienausstattung wünscht. Dies erhöht den Kostendruck für Aktive Sicherheitssysteme.

- Klare Systemgrenzen:
Die Grenzen des Sicherheitssystems sollen klar zu erkennen und die Bedienung einfach sein. Die Bedienung der Systeme soll über Hersteller Grenzen hinweg standardisiert sein.

Anforderungen der Fahrzeughersteller:

- Geringe Herstellungskosten des Fahrzeugs:
Da die Kunden nicht bereit sind, Aufpreise für Sicherheitssysteme zu zahlen, müssen die Kosten für Aktive Sicherheitssysteme durch den Grundpreis des Fahrzeugs gedeckt werden. Geringe Kosten sind deshalb für Aktive Sicherheitssysteme besonders wichtig. Bei einigen Systemen sind Kostensenkungen durch Einbeziehen von Infrastrukturmaßnahmen möglich, beispielsweise durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation.
- Markenprägende Systeme und Wettbewerbsdifferenzierung:
Mechatronische Systeme werden in Zukunft zu den wichtigsten Differenzierungsmerkmalen der Fahrzeughersteller gehören. Deshalb besteht auch bei Aktiven Sicherheitssystemen die Anforderung nach einer markentypischen Ausprägung und einer Differenzierung vom Wettbewerber. Dies spiegelt sich beispielsweise in den zahlreichen Bezeichnungen für Stabilisierungssysteme bei verschiedenen Herstellern wider. Mit einer eigenen Bezeichnung soll die markentypische Auslegung des Systems betont werden.

Die verschiedenen Anforderungen der öffentlichen Hand enthalten Zielkonflikte, da die Anforderungen zum einen aus der Fürsorgepflicht des Staates entstehen, zum anderen aus dem Wunsch, die Investitionen in die Infrastruktur gering zu halten:

- Senken der Unfall- und Opferzahlen:
Von staatlicher Seite besteht die Anforderung Aktive Sicherheitssysteme mit einem maximalen Sicherheitsgewinn einzuführen.
- Geringe Investitionen in die Infrastruktur:
Aktive Sicherheitssysteme sind so zu gestalten, dass keine oder nur geringe Investitionen in die Infrastruktur nötig sind, da die Bereitschaft der öffentlichen Hand solche Investitionen zu tätigen, zumindest in Europa gering ist.

2.2.2 Kritische Punkte bei der Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen

2.2.2.1 Umgebungserfassung und Aktorik

Aktive Sicherheitssysteme und Fahrerassistenzsysteme besitzen als mechatronische Systeme eine logische und eine physikalische Ebene [WIKIPEDIA 2006A]. Die Funktion des mechatronischen Systems ist von den Schnittstellen zwischen logischer und physikalischer Ebene gekennzeichnet, den Sensoren und Aktoren. Dabei müssen die Sensoren im Bereich der Fahrumgebungserfassung

die hoch entwickelten sensorischen Fähigkeiten des Menschen ersetzen oder zumindest ergänzen, eine Aufgabe, die noch erhebliches Entwicklungspotential bietet.

Die Möglichkeiten und die Qualität der Fahrumgebungserfassung haben direkten Einfluss auf alle Beurteilungskriterien für ein Aktives Sicherheitssystem sowie auf die Machbarkeit eines Systems.

Wichtigste Kriterien für die Beurteilung von Systemen zur Fahrumgebungserfassung sind Erfassungssicherheit, Umfang der Erfassung (d.h. welche Größen werden erfasst), Reichweite und Genauigkeit.

Die Fahrumgebungserfassung kann aus einzelnen Sensoren, unabhängigen verschiedenen Sensoren oder einem Sensorsystem mit Sensordatenfusion bestehen. Eine weitere Möglichkeit zur Umgebungserfassung ist die Kommunikation mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur. Digitale Karten, die im Fahrzeug mitgeführt oder von einem zentralen Server abgerufen werden, zählen ebenso zur Fahrumgebungserfassung.

Die Aktorik eines Aktiven Sicherheitssystems stellt dem Fahrer Anzeigen und Warnungen zur Verfügung (Mensch-Maschine-Interface) und führt Eingriffe in die Fahrdynamik (z.B. Brems- oder Lenkeingriffe) durch. Durch den zunehmenden Einsatz mechatronischer Systeme im Fahrzeug wie elektrischer Servolenkung, Überlagerungslenkung oder elektronischen Bremsregelsystemen, stehen die wichtigsten Aktoren für Fahrdynamikeingriffe in vielen Fahrzeugen bereits zur Verfügung. Der Aufwand für die Umsetzung der nötigen funktionalen Sicherheit nimmt jedoch zu, sobald mehrere Systeme auf diese Aktoren zugreifen.

2.2.2.2 Sicherheitsgewinn und Wirksamkeit

Ziel eines Aktiven Sicherheitssystems ist die Verbesserung der Verkehrssicherheit (Sicherheitsgewinn). Die Sicherheit wird erhöht, wenn die absolute Anzahl der Unfälle N bzw. Unfallopfer N_O oder die Anzahl der Unfallopfer pro Personenkilometer n_O reduziert wird. Wie groß der Sicherheitsgewinn ist, hängt von der Anzahl der relevanten Situationen, die in einem betrachteten Zeitraum auftreten, der Wirksamkeit des Systems, seiner konstruktiven Sicherheit und dem Schutz gegen Missbrauch ab.

Die Wirksamkeit des Aktiven Sicherheitssystems η bezeichnet das Verhältnis der Anzahl von relevanten Situationen, d.h. Situationen, in denen das System handeln soll N_e , zur Anzahl der Situationen, in denen die Handlung des Systems zum gewünschten Ergebnis führt N_i , z.B. der Unfall verhindert oder die Kollisionsschwere verringert wird.

$$\eta = \frac{N_i}{N_e}$$

Vereinfacht kann angenommen werden, dass durch ein Aktives Sicherheitssystem die Anzahl der Unfälle um N_i verringert wird.

Es besteht die Gefahr, dass die Sicherheit durch ein Sicherheitssystem nicht verbessert, sondern verschlechtert wird, d.h. die Anzahl der Unfälle N erhöht wird. Grund dafür ist die Risikohomöostase [DORNHÖFER, PANNASCH 2000 S. 8]. Durch das zusätzliche Sicherheitssystem fühlt der Fahrer eine Verbesserung der subjektiven Sicherheit, welche er durch ein risikoreicheres Verhal-

ten ausgleicht, wenn er aus seinem Verhalten Vorteile ziehen kann. Dadurch entsteht eine Anzahl zusätzlicher Unfälle N_R . Bei kleiner Wirksamkeit η oder nur wenigen relevanten Situationen N_e werden nur wenige Unfälle verhindert, der Gewinn an objektiver Sicherheit N_i ist gering. Für den Fall, dass N_R größer als N_i ist, wird die Anzahl der Unfälle N erhöht und die Sicherheit verschlechtert.

Um diese Überkompensation zu verhindern, ist ein Sicherheitssystem so zu entwickeln, dass:

- die Anzahl der relevanten Situationen N_e hoch ist.
- der Zuwachs an subjektiver Sicherheit gegeben aber nicht zu hoch ist.
- die möglichen Vorteile, die der Fahrer aus risikoreicherem Verhalten ziehen kann, gering sind.
- die Wirksamkeit η hoch ist.

Die Wirksamkeit η eines Aktiven Sicherheitssystems ist neben diversen anderen Parametern von der Handlungsart des Aktiven Sicherheitssystems abhängig. Bei den möglichen Handlungen von Fahrerassistenzsystemen wird zwischen vier Kategorien unterschieden: Information, Warnung, Unterstützung und autonomer Eingriff:

- Information:
Der Fahrer wird deutlich vor einer möglichen kritischen Situation über ein Ereignis oder eine Sachlage informiert.
- Warnung:
Der Fahrer wird bei Auftreten einer kritischen Situation gewarnt, das System greift jedoch nicht selbst in die Fahrdynamik ein.
- Unterstützung:
Bei Auftreten einer kritischen Situation greift das System in die Fahrdynamik ein, um die korrekte Handlung des Fahrers zu unterstützen. Der Fahrer kann das System jederzeit übersteuern.
- Autonomer Eingriff:
Das System greift bei einer kritischen Situation selbstständig ein. Der Fahrer hat keine oder nur eine eingeschränkte Möglichkeit das System zu übersteuern.

Die Übergänge zwischen den Kategorien sind fließend und innerhalb einer Kategorie sind verschiedene Ausprägungen möglich. Tabelle 2-1 zeigt die typischen Charakteristiken verschiedener Handlungsarten.

Die Wirksamkeit von autonom eingreifenden Systemen ist höher einzuschätzen als die von warnenden oder unterstützenden Systemen, da deren Wirksamkeit vollständig oder teilweise von der korrekten Fahrerhandlung abhängt, die nicht in allen Fällen gegeben ist. Wichtig bei warnenden Systemen ist eine geringe Anzahl von Fehlwarnungen (False-Positive), da zu viele Fehlwarnungen die Reaktion des Fahrers auf die Warnung verschlechtern [ZABYSHNY & RAGLAND 2003 S. 6]. Zudem ist eine Reaktion des Fahrers auf die Fehlwarnung möglich, die eine kritische Situation erzeugt. Je nach System und Situation sind warnende oder unterstützende Systeme nicht darstellbar,

2. Entwicklungsmethode „Top-Down“

weil die Reaktionszeit des Fahrers zu lang ist, um noch rechtzeitig eingreifen zu können (siehe 5.3.3.3).

Tabelle 2-1: Handlungsarten bei Aktiven Sicherheitssystemen (angelehnt an JÜRGENSOHN, TIMPE [2001, S. 75])

Handlung	Dringlichkeit	Notwendige konstruktive Sicherheit	Letzte Entscheidung	Beispiel
Information	gering	gering	Fahrer	Verkehrsmeldungen
Warnung	mittel	hoch	Fahrer	Stop-Schild-Assistenz
Unterstützung	hoch	sehr hoch	Fahrer	Bremsassistent
Autonomer Eingriff	maximal	maximal	System	ESP / DSC

Die Wirksamkeit von Systemen, bei denen der Fahrer den Fahrdynamikeingriff übernimmt oder übersteuern kann, kann nur über Versuche bestimmt werden (siehe 4.5), da die Handlung des Fahrers nur begrenzt berechenbar oder simulierbar ist. Bei autonom eingreifenden Systemen kann die Wirksamkeit auch durch Simulationen abgeschätzt werden.

Die konstruktive Sicherheit eines Aktiven Sicherheitssystems hat ebenfalls Auswirkungen auf den Sicherheitsgewinn. Durch die Handlungsmöglichkeiten des Systems können Fahrer oder Fahrzeug im Fall einer Fehlfunktion so beeinflusst werden, dass eine kritische Situation oder ein Unfall erst entsteht. Kritische Situationen und Unfälle, die durch einen konstruktiven Fehler entstehen, verringern den Sicherheitsgewinn. Sie sind aber besonders hinsichtlich rechtlicher Fragen (siehe 2.2.2.4) und Akzeptanz (siehe 2.2.2.3) kritisch.

Auch ein wirksames und konstruktiv sicheres Aktives Sicherheitssystem kann insgesamt nur dann zu einem Gewinn an Sicherheit führen, wenn der Fahrer die Eigenschaften des Systems nicht missbraucht [JÜRGENSOHN, TIMPE 2001, S. 50] und dadurch zusätzliche Risiken generiert. Ein Missbrauch des Systems durch den Fahrer ist dabei meist durch den Wunsch des Fahrers nach zusätzlicher Effektivierung, z.B. über zusätzlichen Komfortgewinn oder mehr Fahrspaß, motiviert. Das Aktive Sicherheitssystem ist deshalb so zu gestalten, dass ein derartiger Missbrauch nicht möglich oder zumindest unattraktiv ist. Ein Beispiel hierfür ist die Parametrierung von Stabilitätssystemen für Nutzkraftfahrzeuge. Die Systeme werden so abgestimmt, dass eine Kurve ohne Systemeingriff schneller durchfahren werden kann als mit Systemeingriff [SCHALLER 2005, KAP. 8, S. 51], der Fahrer also seine Fahrzeit nicht durch absichtliches Überschreiten der Regelgrenze effektivieren kann.

2.2.2.3 Akzeptanz

Fahrerassistenzsysteme allgemein und in besonderem Maße Aktive Sicherheitssysteme greifen in das Verkehrsgeschehen ein und beeinflussen damit die Sicherheit des Straßenverkehrs sowie

das Fahrerlebnis. Zusätzlich zu rechtlichen Rahmenbedingungen (siehe 2.2.2.4) die bei Aktiven Sicherheitssystemen einzuhalten sind, muss auch sicher gestellt werden, dass diese Eingriffe von den Verkehrsteilnehmern, besonders Fahrern und Mitfahrern, akzeptiert werden. Aktive Sicherheitssysteme, die nicht akzeptiert werden, sind nicht wirksam, da sie entweder deaktiviert oder gar nicht erst gekauft werden (siehe auch [KOMPASS & HUBER 2006, S. 5]).

Die Frage, ob ein neues technisches Produkt vom Kunden akzeptiert wird, ist komplex. Dies gilt besonders für ein Endkundenprodukt wie das Automobil, das neben rationalen auch stark von emotionalen Gesichtspunkten geprägt ist. Aktive Sicherheitssysteme haben das Ziel, die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen. Das objektive Erreichen dieses Ziels ist für die Akzeptanz notwendig, jedoch nicht hinreichend. Da Aktive Sicherheitssysteme als technische Systeme hinsichtlich möglicher Fehlfunktionen nie völlig sicher sein können, wird bei einem Aktiven Sicherheitssystem nicht nur ein bekanntes Risiko verringert, es entsteht auch durch die Möglichkeit, dass das System versagt, ein neues Risiko. FRITZSCHE [1986 S. 81F] zeigt, dass die Akzeptanzgrenzen für Risiken je nach Art der Exposition in unterschiedlicher Größenordnungen liegen (siehe Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Zusammenhang zwischen akzeptiertem Risiko und Art der Exposition nach FRITZSCHE [1986 S. 81F]

Exposition	Akzeptiertes individuelles Todesrisiko pro Person und Jahr
Großtechnologie	10^{-7}
unfreiwillig	10^{-6}
beruflich	10^{-5}
freiwillig	10^{-2}

Tatsächlich zeigen die Untersuchungen von ZIEMS [2004, S.621], dass die Abgabe von Verantwortung an ein Fahrerassistenzsystem eine der zentralen Akzeptanzbarrieren darstellt, weil ein Versagen der Technik befürchtet wird.

Die durch ein Aktives Sicherheitssystem neu hinzukommenden Risiken müssen deshalb um Größenordnungen kleiner sein, als die Reduzierung des Risikos durch das Aktive Sicherheitssystem. Die subjektive Risikobeurteilung bei der Einführung von neuen Sicherheitssystemen ist von der Einführung Passiver Sicherheitssysteme wie Gurt oder Airbag bekannt. Um mögliche Fehler und das durch sie verursachte Risiko bei komplexen Fahrerassistenzsystemen zu bewerten und zu beherrschen, schlagen STEININGER U.A. [2005 S. 20FF] einen globalen integrativen Ansatz vor und zeigen drei Konzepte zur Risikobewertung.

Viele Autofahrer neigen zur Selbstüberschätzung. So wird je nach Quelle ein Wert von 70 bis 90 Prozent der Autofahrer angegeben, die sich in Umfragen als überdurchschnittlich gut einschätzen (z.B. [SCHMIDBAUER 2006]). Die Selbstüberschätzung führt unter anderem dazu, dass viele Fahrer Aktive Sicherheitssysteme für nicht notwendig halten und aus diesem Grund nicht akzeptieren. Nach ZIEMS [2004, S. 622] kann auch ein funktionierendes Aktives Sicherheitssystem zu einem negativen Fahrerlebnis führen, wenn es den Fahrer (und mögliche Mitfahrer) auf Fehler und Unzulänglichkeiten hinweist.

2.2.2.4 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für Fahrerassistenzsysteme und Aktive Sicherheitssysteme enthalten nationales Recht und internationale Übereinkommen. Nach SEEK, GASSER [2006 S. 1] ist die wichtigste internationale Zulassungshürde für Fahrerassistenzsysteme das Wiener ÜBEREINKOMMEN ÜBER DEN STRASSENVERKEHR [1968], in dem eindeutig gefordert wird, dass ein menschlicher Fahrer jederzeit sein Fahrzeug beherrschen muss.

Die deliktische Haftung, d.h. die Haftung aufgrund einer schuldhaften Pflichtverletzung (vgl. [AMENT 2006 S. 4]), beim Betrieb von Fahrerassistenzsystemen berührt die Bereiche Halterhaftung, Fahrerhaftung und Produkthaftungsgesetz. Nach SEEK, GASSER [2006 S. 6] führt die aktuelle deutsche Rechtssituation in diesen Bereichen in der Praxis zu einer Haftungsverteilung, die bei nicht übersteuerbaren Fahrerassistenzsystemen beim Fahrzeughalter liegt. Die Grundlage des Regelwerks der deliktischen Haftung ist der menschliche Fahrer. Die Möglichkeit von Fahrerassistenzsystemen, die zumindest zeitweise die Kontrolle über ein Fahrzeug erlangen können, ist nicht vorgesehen.

Letztendlich können nicht übersteuerbare Fahrerassistenzsysteme, die die Fahrzeugführung übernehmen, in Deutschland bis zu einer Überarbeitung und Neubewertung des Haftungsrechts nur unter großer Rechtsunsicherheit eingeführt werden.

2.3 Bottom-Up-Methode

Die Fähigkeiten und Möglichkeiten eines Fahrerassistenzsystems sind stark von den Möglichkeiten der Sensorik bestimmt (siehe 2.2.2.1). Sensoren und Aktoren sind als Hardwareelemente auch die Teile eines Fahrerassistenzsystems, die am stärksten zu den Gesamtkosten beitragen. Deswegen werden Fahrerassistenzsysteme häufig mit einem bottom-up-geprägten Prozess entwickelt. Im Bereich Fahrerassistenzsysteme wird unter dem Begriff Bottom-Up die Entwicklung ausgehend von Teilsystemen wie Sensorik oder Aktorik hin zur gesamten Applikation verstanden (siehe Bild 2-4). Die Situationsinterpretation stellt dabei die Ebene dar, in der die Sensordaten zu einem Gesamtbild der Fahrumgebung zusammengesetzt (Sensordatenfusion) und einer bestimmten Verkehrssituation zugeordnet werden. Bei der Bottom-Up-Entwicklung wird aus den Eigenschaften der Sensorik abgeleitet, welche Verkehrssituationen erkannt werden können. Die Möglichkeiten der Situationsinterpretation bestimmen, welche Applikation darstellbar ist. Die Applikation bezeichnet das Gesamtsystem aus Situationsinterpretation, Bewertung, Handlungsentscheidung und Mensch-Maschine-Schnittstelle. Das Unfallgeschehen spielt in einer reinen Bottom-Up-Entwicklung nur insofern eine Rolle, als die fertige Applikation dem Unfallgeschehen gegenübergestellt wird und untersucht wird, wie viele Unfälle verhindert werden können.

Die Bottom-Up-Entwicklung hat ihre Entsprechung im rechten Ast des V-Modells, der Integration. Sie eignet sich, um vorhandene Teilsysteme in kurzer Zeit zu einem Gesamtsystem zusammenzufügen. So wird beispielsweise mit Sensoren und Aktoren, die von einem Zulieferer gekauft werden, ein Fahrerassistenzsystem dargestellt.

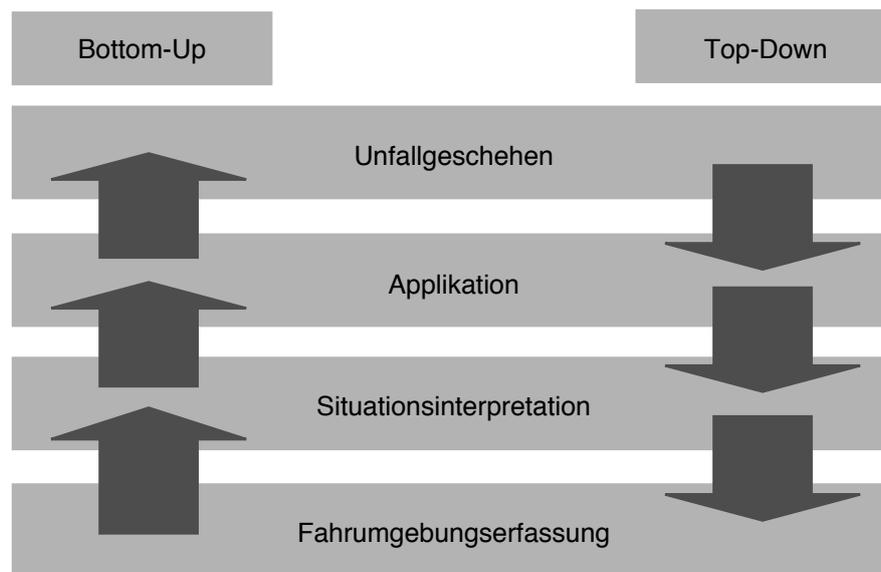


Bild 2-4: Bottom-Up und Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen.

Die kurze Zeitspanne ist besonders für seriennahe Entwicklungen wichtig. Für eine erfolgreiche Bottom-Up-Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems müssen die Informationen, die im linken Ast des V-Modells erzeugt werden, die Testfälle und das Anwendungsszenario bereits bekannt sein. Die Bottom-Up-Entwicklung eignet sich dort, wo die Komplexität und Anzahl der möglichen Situationen beschränkt ist und schon bei Beginn der Entwicklung das Entwicklungsziel möglichst genau vorgegeben ist.

2.4 Top-Down-Methode

Nach EHRENSPIEL [1995, S. 203] ist das wesentliche Ziel des Entwickelns, die Eigenschaften des Produkts so festzulegen, dass sie den Wünschen des Nutzers und des Marktes so weit wie möglich entsprechen. Im Bereich der Aktiven Sicherheitssysteme ist der zentrale Wunsch die Verhinderung von Unfällen, bzw. die Entschärfung von kritischen Situationen. Die Top-Down-Methode stellt diese Hauptforderung an den Ausgangspunkt der Entwicklungstätigkeit.

In komplexen Umgebungen mit vielen möglichen Verkehrssituationen ist die in 2.3 beschriebene Bottom-Up-Entwicklung nur begrenzt zielführend zu gestalten. So ist es beispielsweise in Kreuzungssituationen nicht ohne weiteres möglich, aus der Vielfalt der möglichen Einzelsituationen diejenigen Situationen auszuwählen, die relevant sind, um mit vertretbarem Aufwand eine möglichst große Anzahl an Unfällen zu verhindern, bzw. den Gesamtschaden an Personen und Fahrzeugen möglichst stark zu verringern. Nicht jede Situation, in der Fahrer unterstützt und Fehler durch ein Sicherheitssystem korrigiert werden können, stellt tatsächlich einen Unfallschwerpunkt dar, der den Aufwand eines solchen Systems rechtfertigt. Bei der Anwendung einer Bottom-Up-Entwicklung für Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen besteht die Gefahr, am tatsächlichen Unfallgeschehen und Bedarf an Aktiven Sicherheitssystemen vorbei zu entwickeln.

Die Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen beginnt mit der Analyse des Unfallgeschehens. Ziel der Analyse ist es, das Unfallgeschehen so aufzubereiten, dass Charakteristiken

für effiziente Aktive Sicherheitssysteme abgeleitet werden können. Dabei werden die Verkehrssituationen klassifiziert und diejenigen ausgewählt, bei denen der Einsatz eines Aktiven Sicherheitssystems eine möglichst große Anzahl an Unfällen verhindern kann. Auf dieser Basis wird die zu entwickelnde Applikation festgelegt. Bei der Entwicklung der Applikation werden die nötigen Teilsysteme abgeleitet, wobei die Situationsinterpretation eine zentrale Rolle einnimmt. Aus den für die Situationsinterpretation benötigten Daten werden am Ende des Prozesses die Anforderungen an die Sensorik bzw. die Fahrumgebungserfassung abgeleitet.

2.5 Entwicklungsprozess für Aktive Sicherheitssysteme mit Top-Down-Orientierung

Für die Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für komplexe Umgebungen wie beispielsweise Kreuzungen ist ein Top-Down-Prozess besser zielführend zu gestalten als ein Bottom-Up-Prozess. Ein reiner Top-Down-Prozess birgt die Gefahr, dass ein System entwickelt wird, dessen Anforderungen an Sensorik und Aktorik nicht umgesetzt werden können. Die in dieser Arbeit vorgestellten Beispielsysteme wurden mit einem Prozess entwickelt, der die Vorteile von Top-Down- und Bottom-Up-Prozess für die Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungssituationen vereint. Grundsätzlich bleibt der Prozess, der in Bild 2-5 schematisch dargestellt ist, eng an die Top-Down-Entwicklung, wie sie in 2.4 vorgestellt wird, angelehnt. Das Unfallgeschehen und die Unfallanalyse bleiben Ausgangspunkt des Entwicklungsprozesses. Die Applikation wird im Gegensatz zur Top-Down-Entwicklung nicht nur auf Basis der Unfallanalyse abgeleitet, sondern es wird zusätzlich eine Machbarkeits-Abschätzung berücksichtigt, die parallel zur Unfallanalyse durchgeführt wird. Die Machbarkeits-Abschätzung beachtet die in 2.2.2 aufgeführten kritischen Punkte bei der Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen, besonders die Fahrumgebungserfassung sowie die Möglichkeiten der Situationsinterpretation. Das Ableiten der Applikation wird so ein iterativer Prozess mit mehreren Durchgängen von Unfallanalyse, Bilden von Applikationen, Machbarkeits-Abschätzung und erneuter Unfallanalyse.

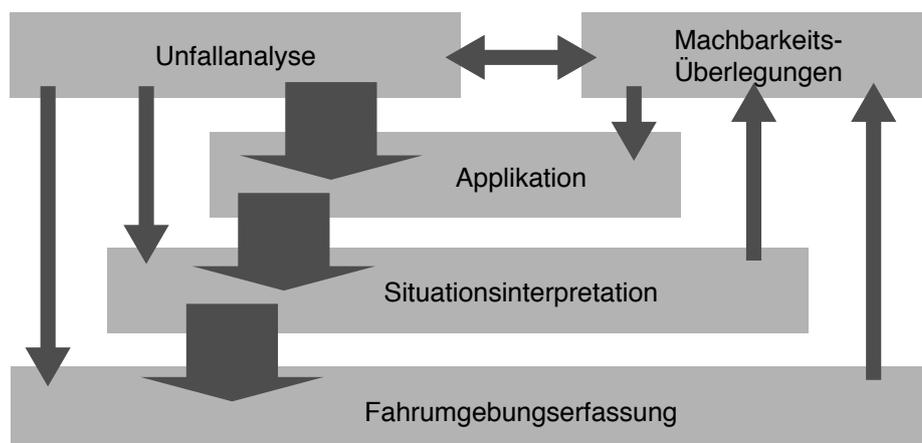


Bild 2-5: Optimierter Top-Down-Orientierter Entwicklungsprozess für Aktive Sicherheitssysteme für komplexe Umgebungen.

Während des ganzen folgenden Entwicklungsprozesses über Situationsinterpretation und Ableiten der Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung, werden bei der Lösung von Teilproblemen die Ergebnisse der Unfallanalyse berücksichtigt. Der Entwicklungsprozess behält eine starke Top-Down-Orientierung, sodass das System für das tatsächliche Unfallgeschehen maßgeschneidert wird. Gleichzeitig kann durch die Machbarkeits-Abschätzung weitgehend sichergestellt werden, dass ein System entwickelt wird, dessen Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung darstellbar sind.

2.6 Entwicklungswerkzeug Fahrsimulation

Beim top-down-orientierten Entwicklungsprozess werden Applikation und Situationsinterpretation unabhängig von einer Fahrumgebungserfassung entwickelt. Der Prozess setzt Entwicklungswerkzeuge voraus, die die Fahrumgebungserfassung ersetzen oder simulieren können. Hier bieten sich Simulationsumgebungen an, in denen mit aufgezeichneten oder künstlich erzeugten Fahr- und Umgebungsdaten gearbeitet werden kann. Daten realer Sensoren können mit Hilfe von Sensormodellen simuliert werden.

Für den Test und die Optimierung der gesamten Applikation inklusive Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMI) eignen sich Fahrsimulatoren. Die Fahrsimulation ist unverzichtbar, wenn die Reaktion des Fahrers für die Wirksamkeit des Systems eine Rolle spielt. Zudem können in der Fahrsimulation künstlich verschlechterte Umgebungsdaten oder Sensormodelle zum Ableiten der Anforderungen an die Umgebungserfassung benutzt werden.

KAUSSNER [2003 S. 7] nennt vier wichtige Vorteile der Fahrsimulation. In Bezug auf die Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen lassen sie sich folgendermaßen darstellen:

- Versuche mit der Applikation sind zu einem Zeitpunkt möglich, an dem die Fahrumgebungserfassung noch nicht im Realfahrzeug zur Verfügung steht. Versuche im Fahrsimulator können benutzt werden, um die Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung abzuleiten. Dazu ist es möglich, die perfekten Simulatordaten künstlich zu verschlechtern oder durch ein Sensormodell abzubilden.
- Über die Fahrumgebungserfassung hinaus stehen zahlreiche Messgrößen aus Fahrzeug und Fahrumgebung zur Verfügung, die ohne aufwendige Sensorik oder Messeinrichtungen erfasst werden können.
- Die Versuchsfahrt im Simulator ist für die Versuchsperson ungefährlicher als in der Realität. Auch werden keine anderen Verkehrsteilnehmer gefährdet. Dies ermöglicht es, den Fahrer unvorbereitet kritischen Situationen auszusetzen, die eine Systemauslösung nach sich ziehen. Eine Erwartungshaltung des Fahrers kann damit so weit wie möglich vermieden werden, was insbesondere bei Warnsystemen wichtig ist, weil die Erwartungshaltung Einfluss auf die Reaktionszeit hat (vgl. 4.3). Vergleichbare Bedingungen lassen sich bei Realversuchen, wenn überhaupt nur auf abgesperrten Testgeländen mit hohem Aufwand erzielen.
- Das Verhalten der Fahrumgebung kann exakt kontrolliert und reproduziert werden.

2. Entwicklungsmethode „Top-Down“

Ein weiterer Vorteil, besonders beim Test von Aktiven Sicherheitssystemen, ist, dass das Verhalten der Fahrumgebung nicht an die physikalischen Grenzen der Realität gebunden ist. So besteht ein großer Spielraum, gezielt Fehler des Fahrers zu provozieren, um die Testsituation herzustellen (siehe 4.5.1 und 5.7.2).

Die Entwicklungskette für den top-down-orientierten Entwicklungsprozess ist in Bild 2-6 dargestellt (siehe auch MEITINGER, EHMANN [2004, S. 148]):

- Identifikation wichtiger unfallrelevanter Fahrsituationen (1)
- Sammeln von Versuchsdaten mit einem Versuchsfahrzeug (2)
Für die Entwicklung der Situationsinterpretation werden Fahr- und Versuchsdaten gesammelt.
- Entwicklung und Test (3)
Das System wird am Arbeitsplatz entwickelt. Mit den aufgezeichneten Versuchsdaten können Offline-Tests der Systemkomponenten durchgeführt werden.
- Durchführen von Online-Tests im Fahrsimulator (4)
Das System wird auf den Fahrsimulator migriert. Dort werden Tests des gesamten Systems mit Versuchspersonen durchgeführt.
- Optimierung des Systems mit Hilfe der Fahrsimulatortests (5)
Systemparameter oder Systemteile können mit Hilfe der Erkenntnisse aus den Fahrsimulatortests optimiert werden.
- Applikation des Systems im Versuchsfahrzeug (6)
Das System wird im Versuchsfahrzeug appliziert. Die vorherige Optimierung im Fahrsimulator gewährleistet einen hohen Reifegrad des Systems.

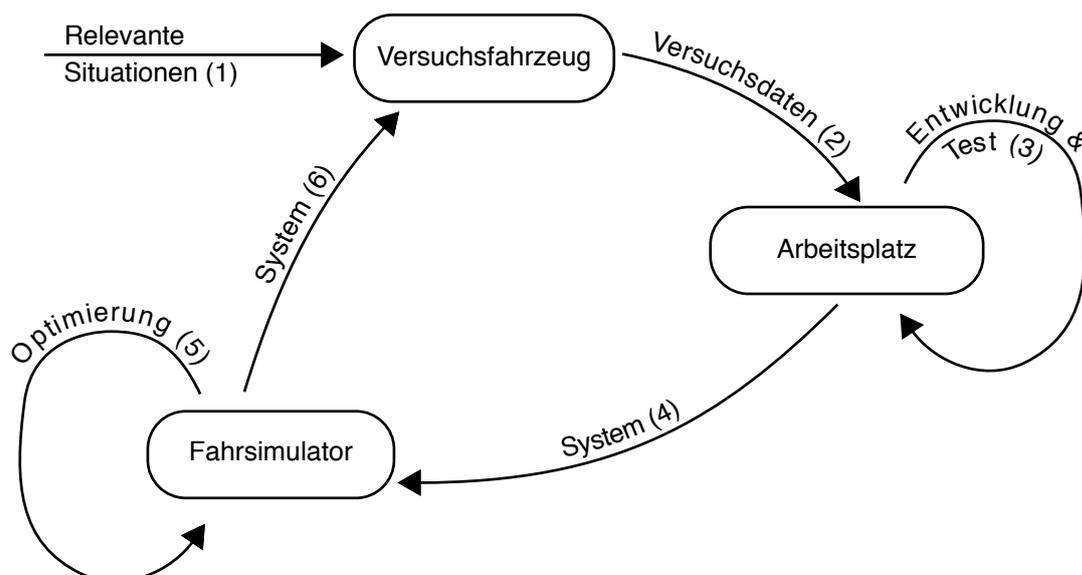


Bild 2-6: Entwicklungskette für den top-down-orientierten Entwicklungsprozess

3 Unfallanalyse

3.1 Die Unfallanalyse in der Top-Down-Entwicklung

Die Analyse des aktuellen oder zu erwartenden Unfallgeschehens bildet die Basis der Top-Down-Methode.

In Kapitel 1.1 wird gezeigt, dass ein Bedarf an Aktiven Sicherheitssystemen zur Reduzierung von Unfällen besteht. Die Unfallanalyse ermöglicht, Schwerpunkte im Unfallgeschehen zu erkennen. Aktive Sicherheitssysteme sind effizienter, wenn sie gezielt gegen die Unfalltypen dieser Schwerpunkte wirken. Ein Merkmal der Top-Down-Vorgehensweise bei der Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen ist die sehr tiefgehende Unfallanalyse, die nicht nur den Unfalltyp bestimmt, der verhindert werden soll, sondern innerhalb eines Unfalltyps eine weitere Unterteilung des Unfallgeschehens vornimmt. Ziel in dieser tieferen Unfallanalyse ist es, Anhäufungen von Merkmalen zu entdecken, die für Systemeigenschaften eines Aktiven Sicherheitssystems relevant sind. Aufgrund der Anhäufung der relevanten Merkmale werden letztlich die benötigten Sicherheitssysteme abgeleitet. Die Unfallanalyse geht so direkt in die Systemdefinition über.

Über die Systemdefinition hinausgehend erlaubt eine detaillierte Unfallanalyse während der späteren Entwicklungsphasen der Top-Down-Vorgehensweise neu auftauchende Fragen aus der Sicht des Unfallgeschehens zu beantworten (siehe 5.1.2 und 5.7.2).

Die Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen stellt spezielle Anforderungen an die Unfallanalyse:

- Aktive Sicherheitssysteme wirken auf Unfallursachen und den Unfallhergang. Die Unfallanalyse muss deshalb die Unfallursachen und den Unfallhergang besonders berücksichtigen.
- Die Unfallanalyse muss detailliert genug sein um die Merkmale der Unfälle präzise analysieren zu können.
- Die Analyse des Unfallgeschehens muss die Häufigkeit der Unfalltypen berücksichtigen um relevante Systeme ableiten zu können. Dabei ist die absolute Anzahl der Unfälle von Bedeutung, nicht das Risiko eines Unfalls in einer bestimmten Situation.

3.2 Verfahren zur Unfallanalyse

Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Methoden zur Analyse des Unfallgeschehens angewendet, um relevante Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen ableiten zu können.

3.2.1 Expertenbefragung und Umfragen

Unfallanalyse kann in vielen Bereichen der Fahrzeugentwicklung helfen, Verbesserungen der Sicherheit zu erreichen. Aus diesem Grund unterhalten praktisch alle Automobilhersteller Abteilungen zur Unfallforschung. So finden sich im Unternehmen Mitarbeiter, die ein großes Expertenwissen über Unfälle haben, das oft über die aufgezeichneten und abgelegten Daten hinausgeht. Um dieses Know-How nutzen zu können, werden zur Analyse des Unfallgeschehens Expertenbefragungen durchgeführt.

Als Methode für die Expertenbefragung hat sich eine Abwandlung der bekannten Brainstorming-Methode (z.B. EHRENSPIEL [1995, S.350]) bewährt. Brainstorming wird allgemein zur Ideengenerierung benutzt. In der verwendeten Abwandlung wird das Brainstorming benutzt, um mögliche kritische Situationen auf Kreuzungen zu finden. Ziel ist dabei die Erstellung eines umfassenden Katalogs bzw. einer Check-Liste von kritischen Situationen, anhand derer abgeleitete Systeme getestet werden können. Eine ähnliche Anwendung von Brainstorming zum Erstellen eines umfassenden Katalogs findet sich bei MEITINGER [2001, S 71ff].

Für die Befragung wurde ein didaktisches Brainstorming (mehrere Fragen mit steigender Detaillierung) mit fünf Teilnehmern und einer Dauer von ca. 90 Minuten durchgeführt. Vier der Teilnehmer arbeiten im Bereich Unfallforschung oder Aktive Sicherheit.

Folgende Fragen wurden im Brainstorming gestellt:

Geringe Detaillierung:

- Welche kritischen Situationen können an einer Kreuzung auftreten?
- In welchen Situationen an einer Kreuzung ist der Fahrer besonders belastet?
- Welche kritischen Situationen können für eine Kreuzung mehrspuriger Straßen typisch sein?

Höhere Detaillierung:

- Welche kritischen Situationen können beim Linksabbiegen auftreten?
- In welchen Situationen ist Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer besonders kritisch?
- In welchen Situationen läuft der Fahrer Gefahr, falsch zu reagieren?

Ergänzungsfrage:

- Wie sieht ein Assistenzsystem aus, das eine der gefundenen kritischen Situationen entschärft oder verhindert und gleichzeitig den Komfort erhöht?

Ergebnis des Brainstormings sind insgesamt 77 Lösungsblätter, wobei zum Teil mehrere Situationen auf einem Blatt beschrieben wurden. Darunter sind 37 Blatt mit wenig situationsspezifischen Aussagen wie beispielsweise „Übersehen von Anderen“. Drei Blatt wurden während einer Pause im Brainstorming zu einer konkreten Strecke ausgefüllt. Die restlichen 37 Blatt beschreiben zum Teil genau detaillierte und mit Skizzen erläuterte Situationen zu den Bereichen Einbiegen/Kreuzen (14Blätter), Abbiegen (13 Blätter) und mehrspuriges Abbiegen (10 Blätter).

Unter den genannten Situationen sind sowohl solche, die aufgrund von Fehlern einzelner Fahrer entstehen, als auch solche, die erst oder besonders durch eine falsche Reaktion eines beteiligten Fahrers kritisch werden. Gehäuft wurde die Situation „mehrspuriges Abbiegen“ in verschiedenen Variationen genannt. In der Diskussion mit den Teilnehmern wurde festgestellt, dass es hier häufig zu Unsicherheiten (richtige Zielspur, bleibt das auf der Nebenspur fahrende Auto in seiner Spur etc.) kommt. Die bei einer denkbaren Kollision beim mehrspurigen Abbiegen auftretenden relativen Geschwindigkeiten dürften allerdings so gering sein, dass PKW-Insassen kaum gefährdet sind. Dies wird von der Einzelunfallanalyse bestätigt (siehe Abschnitt 3.2.4). Ebenfalls wurden häufig Fehler beim Linksabbiegen in verschiedenen Varianten genannt. Generell überwiegen bei den detailliert erläuterten Situationen komplexe Szenarien.

Obwohl die Mehrzahl der Teilnehmer des Brainstormings Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen und/oder Unfallforschung haben, muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass die genannten Situationen und die Häufigkeit der Nennung dem subjektiven Empfinden der Teilnehmer entsprechen. Situationen, die die Teilnehmer als gefährlich einstufen, die ihnen hohe Konzentration abverlangen oder die sie selbst schon als kritisch erlebt haben, werden gehäuft genannt. Detailliert beschriebene oder skizzierte Situationen und Kreuzungsszenarien decken sich oft mit der persönlichen Erfahrung. Die häufig genannten Situationen Linksabbiegen und mehrspuriges Abbiegen sind auch als Situationen zu interpretieren, in denen der Fahrer ein hohes Risiko empfindet und sich eine Unterstützung wünscht. Aktive Sicherheitssysteme für diese Situationen erhöhen also nicht nur die objektive Sicherheit, sondern bei entsprechender Gestaltung, auch die subjektive Sicherheit der Fahrer. Die häufige Nennung von komplexen Szenarien ist auch dadurch begründet, dass die Anzahl einfacher Szenarien begrenzt ist. Da die Teilnehmer durch das Brainstorming jedoch aufgefordert sind, viele Situationen aufzuzeichnen wechseln Sie zwangsläufig zu komplexeren Kreuzungsszenarien.

Alternativ zur Expertenbefragung können Umfragen mit einem erweiterten Teilnehmerkreis durchgeführt werden. Eine weit entwickelte Methode in Form eines Konfliktfragebogens stellen KOPF ET AL. [2001, S. 4] vor. Dabei werden die Teilnehmer nach Konflikttyp, Umgebungsparameter, Fahrerreaktion und Fahrerzustand einer kritischen Situation befragt, die sie selbst erlebt haben.

3.2.2 Theoretische Überlegungen

Als Ergänzung zu bestehenden Informationen und unabhängig davon, können theoretische Überlegungen zum Unfallgeschehen durchgeführt werden. Die Überlegungen können verschiedenste Ausprägungen haben:

- Durchgehende theoretische Betrachtung des Unfallgeschehens:
Die Analyse des Unfallgeschehens beruht ausschließlich auf Daten, die nicht in Zusammenhang mit tatsächlichen Unfällen stehen. Es wird versucht, alle möglichen Unfälle aufzuschlüsseln, die theoretisch denkbar sind. Diese Methode ist wenig zielführend und nur in Sonderfällen als Ergänzung geeignet.
- Theoretische Betrachtung einzelner Unfalltypen als Ergänzung zu vorhandenen lückenhaften Informationen:
Dort, wo bestimmte Unfalltypen für die Auslegung von Aktiven Sicherheitssystemen

wichtig sind, die Informationen aus anderen Analysemethoden jedoch fehlen, ist eine Ergänzung durch theoretische Überlegungen sinnvoll.

- Ergänzung vorhandener Informationen durch theoretische Überlegungen:
Auch wenn Informationen über einen Unfalltyp vorhanden sind, reichen sie im Allgemeinen nicht aus, um alle während der Entwicklung auftauchenden Fragen zu beantworten. Hier sind theoretische Überlegungen im Detail sinnvoll, besonders dann, wenn Informationen aus begleitenden Untersuchungen, z.B. über mögliche Unfallursachen oder vergleichbare Unfalltypen, miteinbezogen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden z.B. in 5.3.3.3 theoretische Überlegungen zusammen mit Messungen und Berechnungen zur Ergänzung vorhandener Informationen benutzt.

3.2.3 Unfallerehebungen und Unfallstatistik

Verkehrsunfälle sind komplexe Vorgänge, die meist nicht auf eine einzelne Ursache zurückzuführen sind und die nur durch eine Vielzahl von Parametern beschrieben werden können. Um aus dem vergangenen Unfallgeschehen Aussagen ableiten zu können, werden in verschiedenen Projekten Unfallerehebungen am Unfallort durchgeführt. Beispiele für diese Unfallerehebungs-Projekte sind die German In-Depth Accident Study GIDAS [GIDAS 2006], das Programm NASS der U.S.-amerikanischen Straßenbehörde NHTSA [APPEL ET AL. 2002, S. 34] oder die Unfallerehebungen von Automobilherstellern (z.B. HÖRAUF, BUSCHARDT [2006]). Die Daten der Unfälle werden in Datenbanken codiert, die entsprechend abgefragt werden können.

Unfallstatistiken werden aus Abfragen von Unfalldatenbanken erstellt. Ohne die komplette Datenbank sind die Abfragen fest und nicht veränderbar, so dass die Interpretierbarkeit der Daten hinsichtlich spezieller Fragestellungen, wie sie für Kreuzungsassistenzsysteme notwendig sind, beschränkt ist. Bei der Auswertung von Unfallstatistiken muss die Repräsentativität der Statistik für den gewünschten Erfassungsraum berücksichtigt werden, ebenso die Intention des Unfallaufnahme und die Art der Unfallaufnahme.

Ein Beispiel für Unfallstatistiken ist die Bundesunfallstatistik [STATISTISCHES BUNDESAMT 2002]. In dieser Statistik sind alle innerhalb der Bundesrepublik Deutschland polizeilich erfassten Unfälle eines Jahres enthalten und nach vielen Kriterien ausgewertet. Da die Unfalldaten von der Polizei aufgenommen werden, muss die Intention der Polizei, nämlich die Schuldfrage im Sinne der StVO zu klären, berücksichtigt werden. Im Unterschied dazu erfolgt die Auswertung der Statistik für die Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen in Bezug auf die potentielle Wirksamkeit dieser Systeme. So wird in der Bundesunfallstatistik Alkoholeinfluss als eigenständige Unfallursache geführt. Alkoholeinfluss als Unfallursache ist aber für die Wirksamkeit eines Aktiven Sicherheitssystems nicht unbedingt entscheidend, auch wenn ein Einfluss möglich ist.

Andere Statistiken sind unter der Intention erstellt worden, die Passive Sicherheit oder die Sicherheit durch die bauliche Gestaltung von Straßen zu verbessern. Entsprechend finden sich in solchen Datenbanken bestimmte Informationen mit hoher Detailgenauigkeit wieder, die Daten, die für die Abschätzung der Wirksamkeit von Aktiven Sicherheitssystemen nützlich sein können, liegen aber oft nur spärlich vor, sind nicht ausgewertet oder fehlen. Nach KOCHERSCHIED [2004] können mit

einigen Abschätzungen und Annahmen trotzdem die benötigten Aussagen aus den vorhandenen Daten extrahiert werden (siehe auch 3.2.2).

In der vorhandenen Arbeit wurden die Bundesunfallstatistik 2001 und eine Auswertung der GIDAS-Datenbank benutzt, die im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekts INVENT (Intelligenter Verkehr und Nutzergerechte Technik) [INVENT 2006] von der VW-Forschung erstellt wurden [VOLKSWAGEN AG, 2006 S. 74ff].

3.2.3.1 Auswertung der Bundesunfallstatistik

Der Jahresbericht des Statistischen Bundesamtes liefert einen Überblick über alle im Laufe eines Jahres in Deutschland polizeilich erfassten Verkehrsunfälle. Im Jahr 2001 waren dies 2373556 Unfälle. Da praktisch alle relevanten Unfälle erfasst werden, ist die Statistik per se für Deutschland repräsentativ, die Detaillierung der Informationen ist jedoch begrenzt. Beispielsweise sind getrennte Unfallzahlen für verschiedene Verkehrsmittel (PKW, LKW, Radfahrer etc.) oft nicht verfügbar. Es stehen aber mehrere Statistiken zur Verfügung, bei denen unterschiedliche Gesichtspunkte des Unfalls, nämlich Unfalltyp, Unfallart und Art der Fehler, betrachtet wurden. Unfalltyp und Unfallart sind nach STATISTISCHES BUNDESAMT [2006 S. 11] wie folgt definiert:

- Der Unfalltyp beschreibt die Konfliktsituation, d.h. die Phase des Verkehrsgeschehens, in der ein Fehlverhalten oder eine sonstige Ursache den weiteren Ablauf nicht mehr kontrollierbar machte.
- Die Unfallart beschreibt vom gesamten Unfallablauf die Bewegungsrichtung der beteiligten Fahrzeuge zueinander bei der ersten mechanischen Einwirkung auf der Fahrbahn.

Werden diese Statistiken gemeinsam betrachtet, kann eine zuverlässigere Aussage erfolgen. Die Relevanz von Kreuzungsunfällen im Unfallgeschehen kann mit Hilfe der folgenden drei Statistiken verdeutlicht werden:

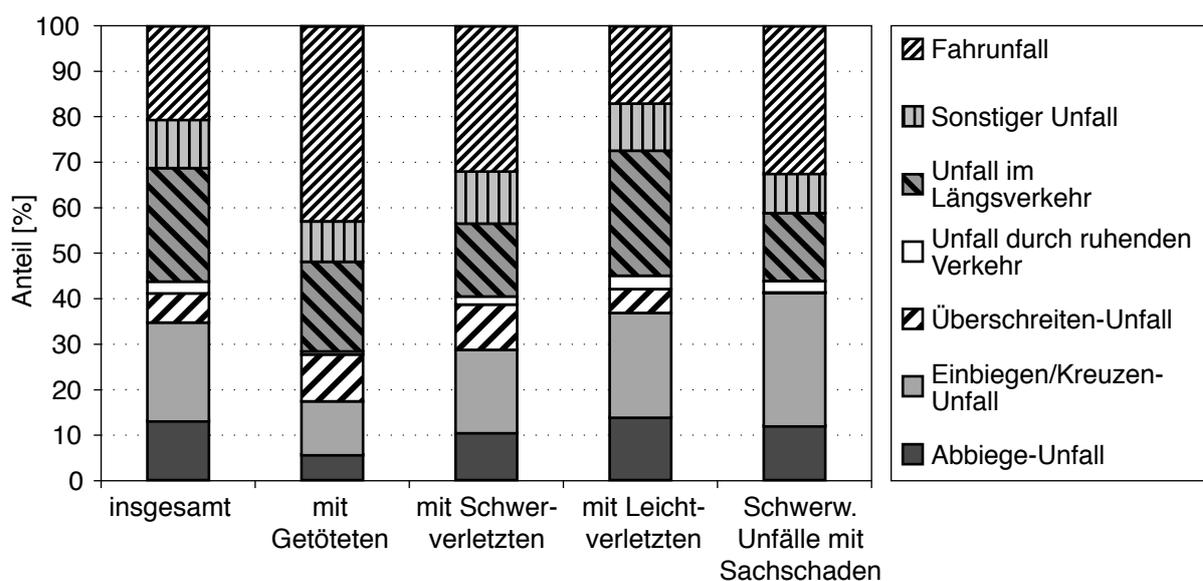


Bild 3-1: Relativer Anteil der Unfälle nach Unfalltypen [STATISTISCHES BUNDESAMT 2002]

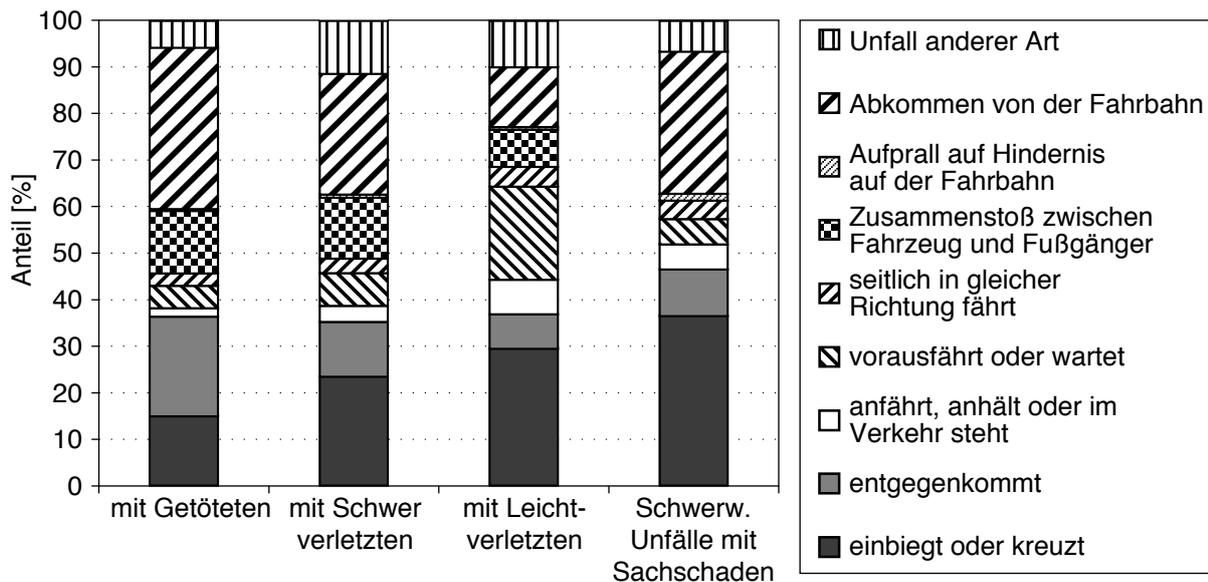


Bild 3-2: Relativer Anteil der Unfälle nach Unfallarten [STATISTISCHES BUNDESAMT 2002]

Die Verteilung der Unfalltypen in Bild 3-1 zeigt, dass bei Unfällen mit Getöteten, Fahrunfälle und Unfälle im Längsverkehr die häufigsten Typen sind. Der Anteil der Kreuzungsunfälle, zu denen die beiden Unfalltypen Einbiegen/Kreuzen-Unfall und Abbiege-Unfall zu rechnen sind, ist am dritthöchsten. Bei Unfällen mit weniger schwerwiegenden Folgen ist der Anteil der Kreuzungsunfälle höher.

Bei einem Abbiege-Unfall ist ein von einer vorfahrtsberechtigten Straße abbiegende Fahrer der Verursacher, bei einem Einbiegen/Kreuzen-Unfall ein von einer untergeordneten Straße einbiegender oder kreuzender Fahrer.

Die Aufgliederung nach Unfalltypen gilt für alle Verkehrsunfälle. Eine getrennte Aufgliederung für Unfälle mit PKW-Beteiligung ist aus den vom Bundesamt veröffentlichten Zahlen nicht zu erstellen.

Die Aufteilung der Unfälle nach Unfallarten (siehe Bild 3-2) erlaubt eine genauere Fokussierung auf PKW-Unfälle. Die Unfallart „Zusammenstoß mit einem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt“ schließt Fußgängerunfälle aus. Abbiegeunfälle können aus der Aufgliederung nach Unfallarten nicht eindeutig identifiziert werden, sie sind Teil der Unfälle „Zusammenstoß mit einem Fahrzeug, das entgegenkommt“. Diese Unfallart beinhaltet aber z.B. auch Überholunfälle auf Landstraßen. Das Bild, das sich bei Einbiegen/Kreuzen-Unfällen zeigt, ist vergleichbar mit dem der Unfalltypen. Etwa 15% der Unfälle mit Getöteten entsprechen dieser Unfallart. Die Bedeutung der Unfallart nimmt mit abnehmender Unfallschwere zu.

Eine weitere Betrachtungsweise erfasst das Fehlverhalten der Fahrzeugführer. Hier ist das Fehlverhalten der PKW-Führer bei Unfällen mit Personenschaden getrennt aufgeführt.

Besonders innerorts zeigt sich auch hier, dass der Anteil der Fehler, die typisch für einen Kreuzungsunfall sind (Vorfahrt, Vorrang und Fehler beim Abbiegen), hoch ist.

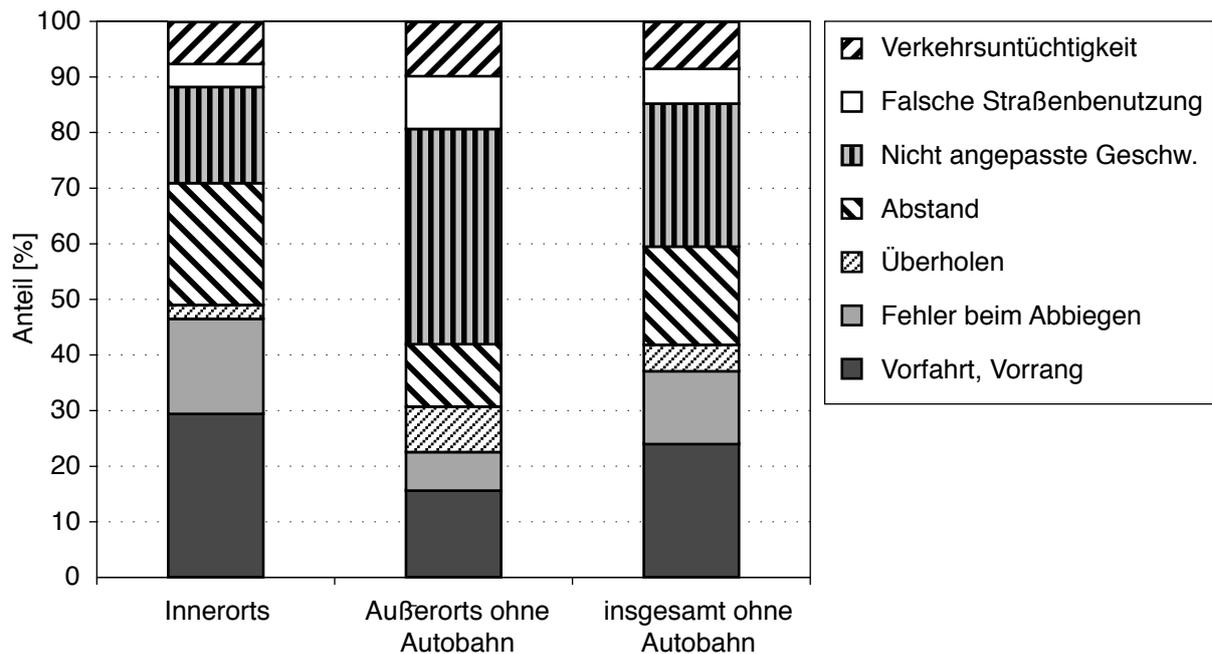


Bild 3-3: Relativer Anteil des Fehlverhaltens von PKW-Führern bei Unfällen mit Personenschaden [STATISTISCHES BUNDESAMT 2002]

Außerorts ist der Anteil geringer, aber immer noch bedeutend (>20%). Die Statistik des Fehlverhaltens ist mit vorliegenden Zahlen auf Unfälle mit Personenschaden und Fehler von PKW-Führern beschränkt und zeigt damit das Unfallvermeidungspotential bei den besonders wichtigen schwereren Unfällen. Die Aussagekraft der Zahlen ist aufgrund des Fehlens anderer Verkehrsteilnehmer (Radfahrer etc.) für Aktive Sicherheitssysteme im PKW sehr gut.

Generell zeigt sich, dass Kreuzungsunfälle mindestens der drittwichtigste Unfalltyp sind. Für die beiden wichtigeren Unfalltypen, Fahr Unfall und Unfall im Längsverkehr, sind Aktive Sicherheitssysteme bereits verfügbar (ESP) oder in der Entwicklung (Notbremsassistent). Mit einer zunehmenden Verbreitung dieser Systeme wird die relative Bedeutung von Kreuzungsunfällen weiter zunehmen. Andere nationale Verkehrsunfallstatistiken, z.B. von Frankreich und Großbritannien, die bei SIMON ET AL. [2006 S. 4] ausgewertet wurden, zeigen eine vergleichbare Bedeutung der Kreuzungsunfälle.

Die Bundesunfallstatistik lässt keine genaue Betrachtung der Unfallhergänge auf Kreuzungen zu. Die mögliche Aufgliederung beschränkt sich auf die Unterscheidung zwischen Abbiegeunfällen (Abbiegen von einer vorfahrtsberechtigten Straße) und Einbiegen/Kreuzen-Unfällen (von einer nicht vorfahrtsberechtigten Straße kommend). Die Bedeutung der Einbiegen/Kreuzen-Unfälle ist dabei höher als die der Abbiege-Unfälle.

3.2.3.2 Auswertung der GIDAS-Datenbank

In der German In-Depth Accident Study (GIDAS) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) werden Verkehrsunfälle mit mindestens einem Verletzten innerhalb zweier Gebiete um die Städte Hannover und Dresden durch Erhebungsteams direkt am Unfallort erfasst. Jährlich werden etwa 2000 Unfälle aufgenommen. Da-

3. Unfallanalyse

bei werden detailliert technische und medizinische Informationen ausgewertet. Der Unfallhergang wird in vielen Fällen rekonstruiert. Im Gegensatz zur Bundesunfallstatistik besteht bei der GIDAS-Datenbank die Möglichkeit eigene Abfragen der Datenbank zu erstellen, das heißt gezielt nach Kombinationen bestimmter Variablen, etwa Fahrzeugtyp, Unfalltyp, Witterung oder Verletzungsschwere, zu suchen. Die mögliche Genauigkeit und Spezialisierung der Abfragen ist aufgrund der hohen Detaillierungstiefe der Datenbank sehr groß.

Im Rahmen des Forschungsprojekts INVENT wurden von der VW-Forschung die in der GIDAS-Datenbank vorhandenen Kreuzungsunfälle (mehr als 2000 Fälle) ausgewertet.

Betrachtet wurde die Häufigkeitsverteilung verschiedener Unfalltypen, Anzahl der Getöteten und Todesrisiko, die Verletzungsschwere bei den einzelnen Unfalltypen, Kollisionswinkel und Anfangsgeschwindigkeit der Verursacher sowie eine Brems- oder Ausweichreaktion von Verursacher und Unfallgegner.

Die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Unfalltypen (Bild 3-4) zeigt, detaillierter aufgeschlüsselt und beschränkt auf PKW und LKW, eine ähnliche Verteilung wie die Bundesunfallstatistik. Der größte Anteil der Kreuzungsunfälle sind Vorfahrtsmissachtungen beim Einbiegen/Kreuzen, wobei ein Großteil der Unfälle an Kreuzungen mit der Beschilderung „Vorfahrt gewähren“ (Zeichen 205 StVO), nur ein kleiner Teil an Kreuzungen mit Stop-Schildern (Zeichen 206 StVO) und ein nochmals kleinerer Teil an rechts-vor-links Kreuzungen geschieht.

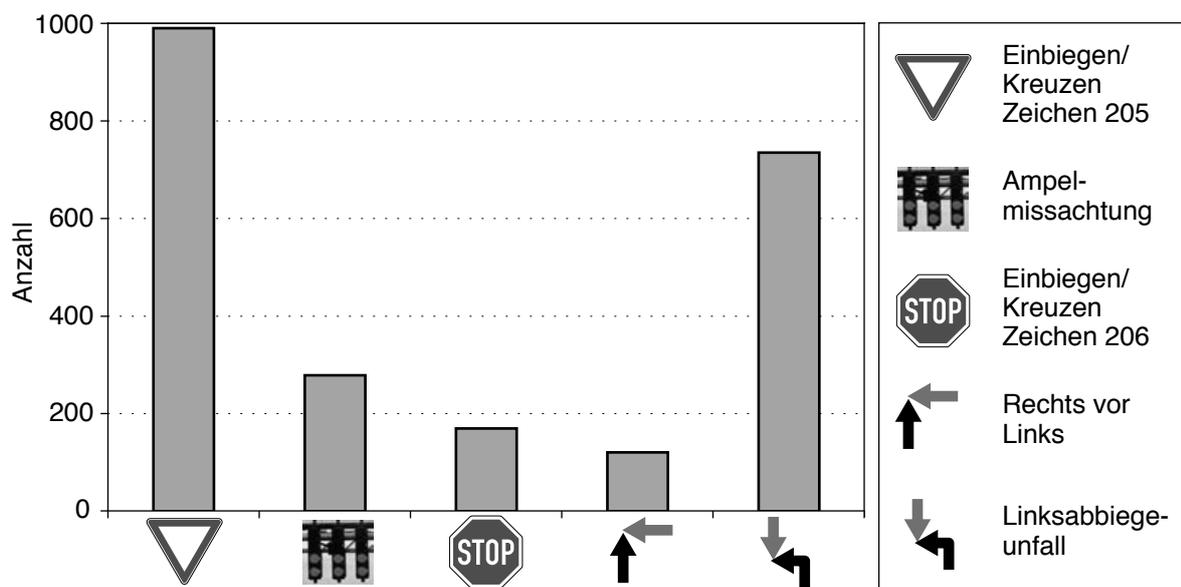


Bild 3-4: Anzahl der Kreuzungsunfälle nach Unfalltyp. Quelle: Auswertung der GIDAS-Datenbank im Rahmen von INVENT.

Linksabbiegeunfälle, d.h. ein Zusammenstoß zwischen Linksabbieger und Gegenverkehr, sind der zweithäufigste Unfalltyp an Kreuzungen. Unfälle durch Missachtung von Ampelsignalen sind weniger häufig.

Aus der Anzahl der Getöteten bei den verschiedenen Unfalltypen (Bild 3-5) ist erkennbar, dass das Todesrisiko bei einem Unfall an einer Stop-Kreuzung erheblich höher ist, als bei den übrigen

Unfalltypen. Allerdings sind die Fallzahlen bei den Getöteten so gering, dass für eine Verallgemeinerung mit einer gewissen Ungenauigkeit gerechnet werden muss.

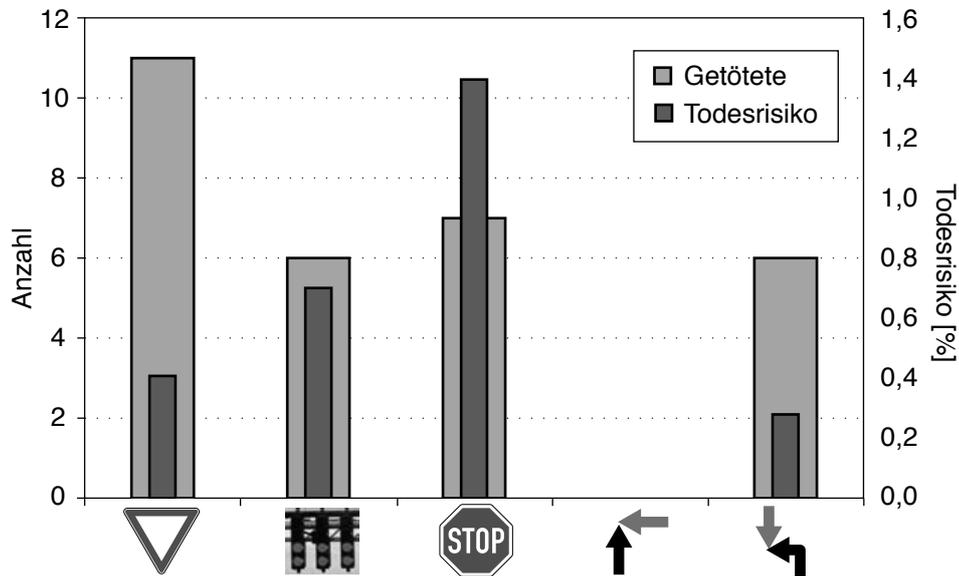


Bild 3-5: Anzahl der Getöteten und Todesrisiko nach Unfalltyp. Quelle: Auswertung der GIDAS-Datenbank im Rahmen von INVENT.

Die Analyse der Ausgangsgeschwindigkeiten beim Linksabbiegen bei den Verursachern (Bild 3-6) zeigt, dass nur etwa 20% der Fahrzeuge mit mehr als 30 km/h und 10% der Fahrzeuge mit mehr als 40 km/h abbiegen.

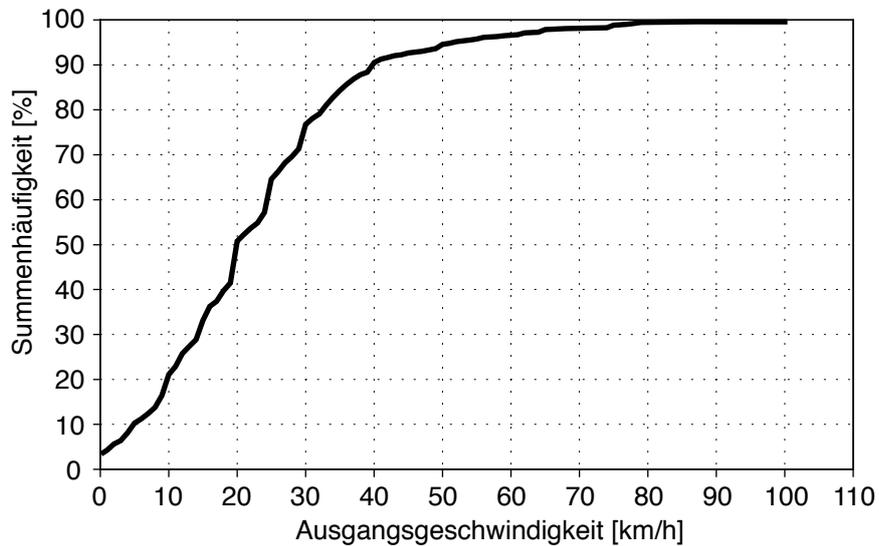


Bild 3-6: Kummulierte Ausgangsgeschwindigkeit der verursachenden Fahrzeuge bei Linksabbiegeunfällen. Quelle: Auswertung der GIDAS-Datenbank im Rahmen von INVENT.

3. Unfallanalyse

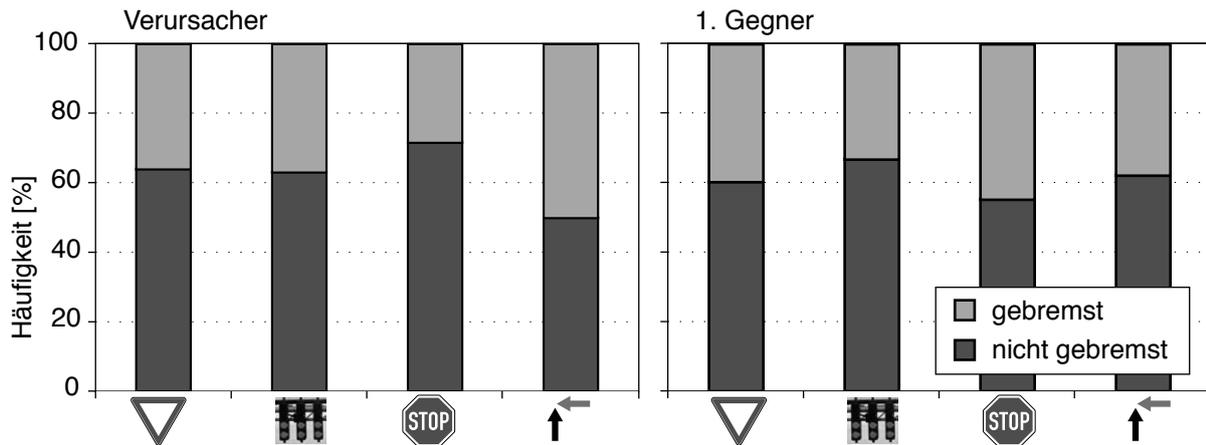


Bild 3-7: Bremsreaktionen von Verursachern und 1. Gegnern nach Unfalltyp. Quelle: Auswertung der GIDAS-Datenbank im Rahmen von INVENT.

Weiterhin wurden die Bremsreaktionen der Unfallverursacher und der ersten Unfallgegner an den verschiedenen Kreuzungstypen ausgewertet (Bild 3-7 für Einbiegen/Kreuzen-Unfälle und Bild 3-9 für Linksabbiegeunfälle). Sowohl bei den Verursachern als auch bei den Unfallgegnern kann in etwa 60% der Fälle keine Bremsreaktion vor dem Unfall nachgewiesen werden. Beim Stop-Schild besteht ein deutlicher Unterschied zwischen dem Verursacher und dem Unfallgegner, wobei der Unfallgegner häufiger bremst.

Bild 3-8 (Einbiegen/Kreuzen-Unfälle) und Bild 3-9 (Linksabbiegeunfälle) zeigen die Lenkreaktionen des Unfallverursacher und des ersten Unfallgegners nach Unfalltyp. Der Vergleich mit der Bremsreaktion zeigt, dass bei allen Unfalltypen sowohl bei Unfallverursachern als auch bei Unfallgegnern häufiger durch Bremsen als durch Ausweichen reagiert wird. Eine Lenkreaktion ist im Vergleich zur Bremsreaktion bei einer Unfallrekonstruktion schwieriger nachzuweisen, weshalb bei den Angaben zur Lenkreaktion eine höhere Unsicherheit besteht.

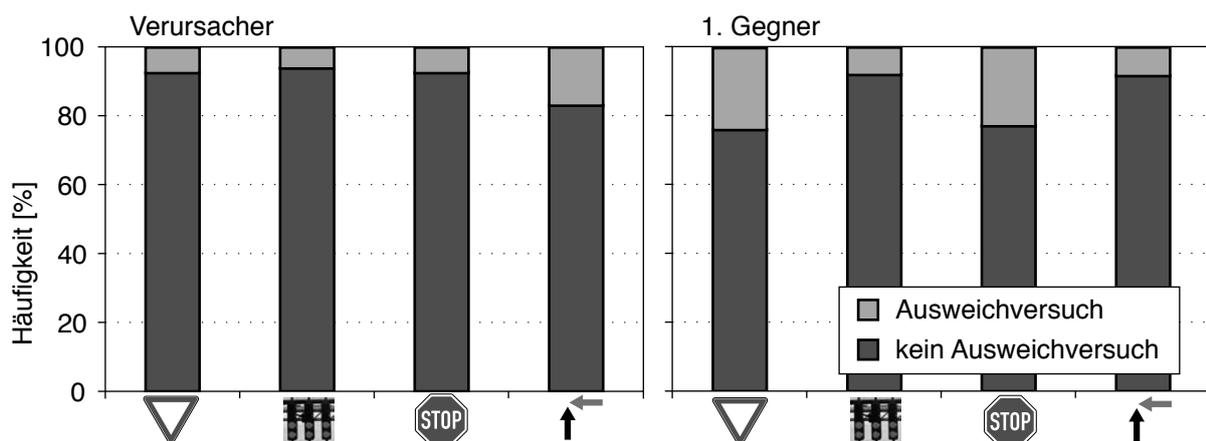


Bild 3-8: Lenkreaktionen von Verursachern und 1. Gegnern nach Unfalltyp. Quelle: Auswertung der GIDAS-Datenbank im Rahmen von INVENT.

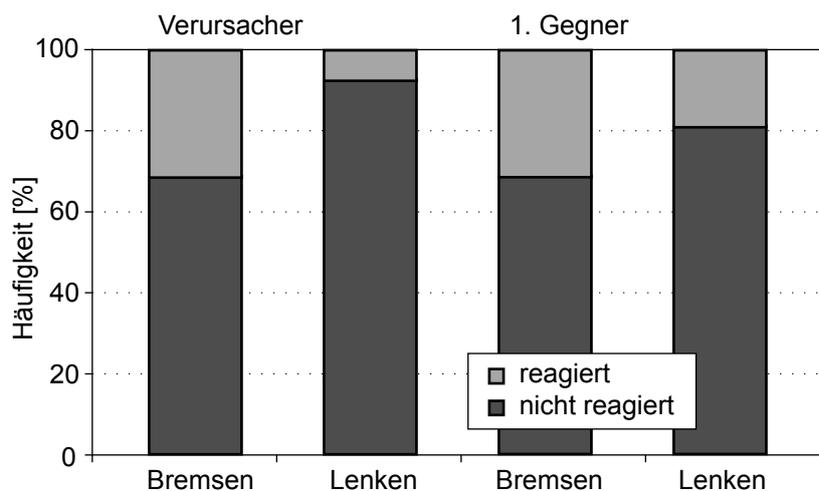


Bild 3-9: Brems- und Lenkreaktion von Verursachern und 1. Unfallgegnern bei Linksabbiegeunfällen. Quelle: Auswertung der GIDAS-Datenbank im Rahmen von INVENT.

3.2.4 Einzelunfallanalyse

Im Gegensatz zur Auswertung einer Datenbank über eine Abfrage werden bei einer Einzelunfallanalyse die Fälle einer Datenbank einzeln ausgewertet. Bei der Einzelunfallanalyse kann die Auswertung unabhängig von festen Datenstrukturen erfolgen, was insbesondere dann von Vorteil ist, wenn bei der Auswertung auf „Rohdaten“ der Unfallaufnahme, die nicht in der Datenbank codiert sind, zurückgegriffen werden kann. In der vorliegenden Arbeit wurden die Kreuzungsunfälle der Unfalldatenbank der BMW-Unfallforschung für die Einzelunfallanalyse benutzt.

Die Unfalldatenbank der BMW-Unfallforschung enthielt zum Auswertzeitpunkt etwa 1600 Unfälle mit BMW-Fahrzeugen und mindestens einem Verletzten im BMW, davon waren 158 Unfälle als Kreuzungsunfälle deklariert. Die Unfälle wurden seit 1978 aufgenommen, wobei lange Zeit ein Fokus auf der Passiven Sicherheit bestand. Deshalb wurde bei der Aufnahme der Unfälle die Rekonstruktion der Unfallursache und des Unfallhergangs in vielen Fällen wenig detailliert durchgeführt. Eine einheitliche Codierung der Daten zum Unfallhergang liegt nicht vor. Bei vielen Unfällen können der Hergang und die Ursache jedoch aus den vorhandenen Rohdaten, etwa mit Hilfe von Fotos, Unfallberichten der Beteiligten und Zeitungsartikeln, gut ermittelt werden.

Bei der Auswertung der Unfälle für die Kreuzungsassistenz wurden die 158 Kreuzungsunfälle einzeln ausgewertet. Dabei wurden für jeden Unfall der Hergang sowie die möglichen Auswirkungen eines Assistenzsystems beschrieben. Die Beschreibungen wurden zusammen mit statistisch relevanten Daten wie den Umweltbedingungen oder der höchsten Verletzungsschwere in eine Tabelle eingetragen.

Anstatt einer statistischen Auswertung der Unfälle, die aufgrund der unterschiedlichen und teils lückenhaften Daten über die Unfallhergänge kaum möglich gewesen wäre, wurde für jeden Unfall bewertet, welches von mehreren möglichen Aktiven Sicherheitssystemen den Unfall hätte verhindern können. Die Charakteristik der betrachteten möglichen Aktiven Sicherheitssysteme wurde erst festgelegt, nachdem die Unfälle beschrieben wurden. Darauf erfolgte die Einteilung, welches System den jeweiligen Unfall verhindern hätte können.

Das Festlegen der möglichen Aktiven Sicherheitssysteme wurde gemäß dem Entwicklungsprozess mit Top-Down-Orientierung (siehe 2.5) in einem iterativen Prozess durchgeführt, der eine Machbarkeits-Abschätzung beinhaltet.

Folgende Skizzen von Systemen wurden für die Einteilung zugrunde gelegt:

- **Einfache Stop-Schild-Warnung:**
Das System erkennt (z.B. aus dem Annäherungsverhalten an die Kreuzung), ob der Fahrer auf ein an der Kreuzung stehendes Stop-Schild reagiert. Hat der Fahrer das Schild übersehen, erfolgt eine Warnung.
- **Warnung/Eingriff bei Vorfahrtsmissachtung:**
Das System erkennt den Querverkehr auf einer vorfahrtsberechtigten Straße und warnt bzw. greift ein, wenn die Vorfahrt eines anderen Verkehrsteilnehmers missachtet wird.
- **Schutz beim Linksabbiegen:**
Der Schutz beim Linksabbiegen erkennt entgegenkommenden Verkehr und verhindert durch Warnung oder Eingriff einen Zusammenstoß, wenn der Fahrer den Gegenverkehr übersieht oder falsch einschätzt. Es wird angenommen, dass eine Warnung genügt hätte, wenn der abbiegende Fahrer vor dem Abbiegen angehalten hatte. Fuhr der abbiegende Fahrer ohne anzuhalten durch die Kreuzung, wurde angenommen, dass die Reaktionszeit für eine Warnung zu lang wäre, und ein aktiver Eingriff notwendig gewesen wäre, um den Unfall zu verhindern.
Die Unterscheidung Eingriff oder Warnung entspricht der Unterscheidung der Situationen Durchfahren oder Anfahren in Kapitel 5.
Im „Schutz beim Linksabbiegen“ sind die Unfälle nicht enthalten, bei denen die Verursacher eine Lichtsignalanlage mit eigener Signalisierung für die Abbiegespur missachteten. Diese werden dem Unfalltyp „Warnung/Eingriff bei Rotlichtmissachtung“ zugeordnet.
- **Warnung/Eingriff bei Rotlichtmissachtung:**
Das System erkennt rote Ampeln und verhindert durch Warnung oder Eingriff die Missachtung des Rotlichts. Die Unterscheidung ob eine Warnung ausgereicht hätte oder ein Eingriff notwendig gewesen wäre, um den Unfall zu verhindern, erfolgte aufgrund einer subjektiven Beurteilung der Situation. Rotlichtmissachtungen sind häufig mit anderen schweren Verkehrsdelikten wie stark überhöhter Geschwindigkeit, Alkohol und Drogen am Steuer oder Amokfahrten verbunden. In solchen Fällen wurde ein autonomer Eingriff als notwendig angenommen.

Bild 3-10 zeigt die Verteilung der ausgewerteten Unfälle ohne die Unterscheidung in warnendes oder eingreifendes System. Die Unterscheidung ist in Bild 3-11 dargestellt. Zu den Kategorien „Warnung“ und „Eingriff“ wurde bei Vorfahrtsmissachtung (beim Einbiegen/Kreuzen) und beim Linksabbiegen, die Kategorie „Eventuell Warnung“ hinzugefügt. In dieser Kategorie sind alle Unfälle aufgeführt, die zwar eindeutig dem jeweiligen Assistenzsystem zuzuordnen sind, in denen jedoch keine Aussage getroffen werden konnte, ob eine Warnung ausgereicht hätte um den Unfall zu verhindern oder ob zwingend ein Eingriff notwendig gewesen wäre.

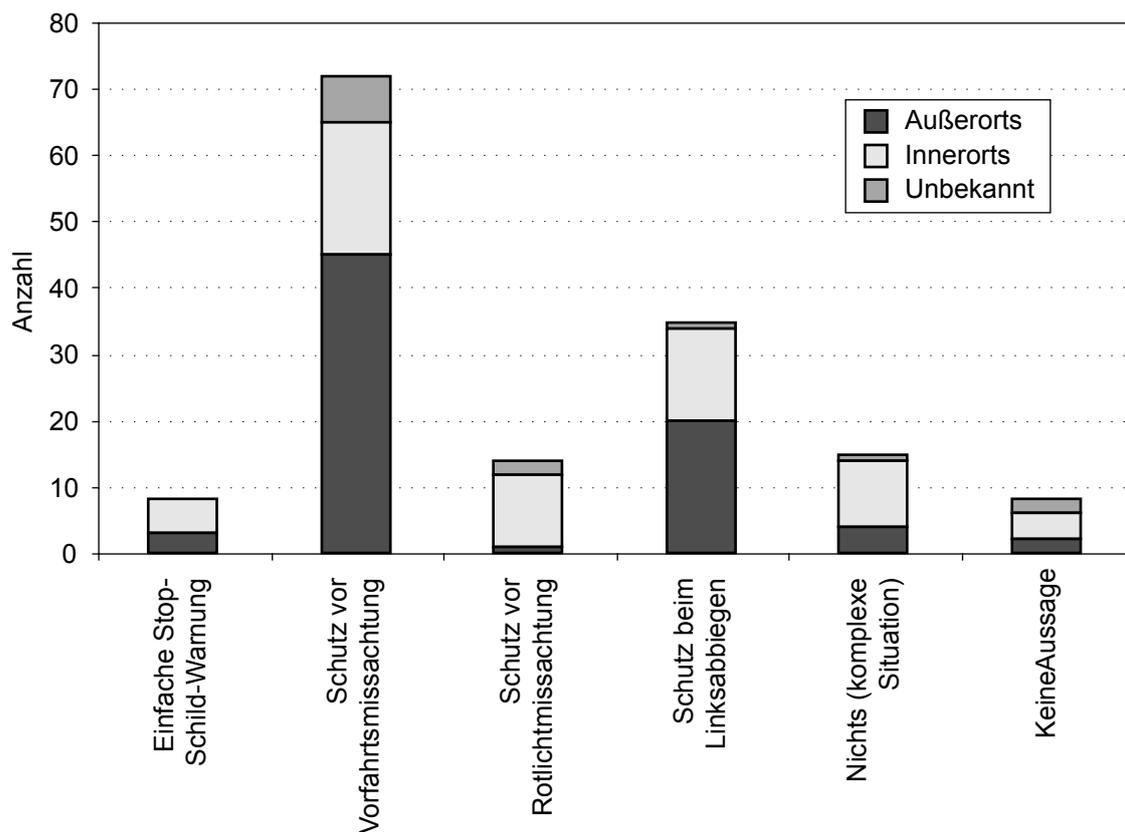


Bild 3-10: Verteilung der Kreuzungsunfälle der BMW-Unfalldatenbank hinsichtlich möglicher Aktiver Sicherheitssysteme.

Jede Kategorie ist weiterhin aufgeschlüsselt in Unfälle außerorts, innerorts und gesamt.

Die Auswertung zeigt, dass Vorfahrtsmissachtung (beim Einbiegen/Kreuzen) der häufigste Unfalltyp in Kreuzungen ist. Es besteht eine relativ hohe Unsicherheit bezüglich der Notwendigkeit eines Eingriffs, es kann aber davon ausgegangen werden, dass bei vielen Unfällen bereits eine Warnung ausgereicht hätte, um den Unfall zu verhindern.

Zweitwichtigster Unfalltyp sind Linksabbiegerunfälle. Auch hier besteht bei vielen Unfällen Unsicherheit, ob eine Warnung ausgereicht hätte oder ein Eingriff notwendig gewesen wäre, um den Unfall zu verhindern. Werden die Unfälle, bei denen ausreichend Informationen vorliegen, betrachtet, kann abgeschätzt werden, dass etwa 30 bis 40 Prozent der Linksabbiegerunfälle durch eine Warnung verhindert werden könnten.

Ein weiterer wichtiger Unfalltyp sind Rotlichtmissachtungen. Versehentliche Rotlichtmissachtungen (Kategorie „Warnung bei Rotlichtmissachtung“) sind dabei etwa doppelt so häufig, wie Rotlichtmissachtungen im Rahmen schwerer Verkehrsdelikte wie Amokfahrten („Eingriff bei Rotlichtmissachtung“).

Eine kleine Anzahl von Unfällen zeichnet sich dadurch aus, dass die Vorfahrt beim Einbiegen oder beim Kreuzen missachtet wurde, weil ein Stop-Schild übersehen oder aus einem sonstigem Grund die Vorfahrtsituation an einer Stop-Kreuzung falsch interpretiert wurde. Dies lässt sich teilweise durch Aussagen der Unfallverursacher direkt bestätigen (Kategorie „Einfache Stop-Schild-Warnung“). Bei einigen Unfällen konnte das Übersehen des Stop-Schildes als Ursache vermutet, aber

3. Unfallanalyse

nicht sicher festgestellt werden (Kategorie „Eventuell einfache Stop-Schild-Warnung“). In allen Fällen wurde angenommen, dass eine Warnung ausreichen würde, um den Unfall zu verhindern. Dieser Unfalltyp bzw. diese Unfallursache wird in den meisten Unfallstatistiken zur Kategorie „Einbiegen / Kreuzen“ gezählt. Mögliche Aktive Sicherheitssysteme unterscheiden sich für die beiden Kategorien jedoch stark (siehe 3.2.3), weswegen hier eine Trennung erfolgt.

Eine verhältnismäßig geringe Anzahl von Unfällen weist eine derart komplexe Situation auf oder ist so selten, dass keines der betrachteten Systeme greifen kann. Zu einer weiteren geringen Anzahl von Unfällen waren so wenig Daten über den Unfallhergang vorhanden, dass eine Auswertung und Beurteilung nicht möglich war.

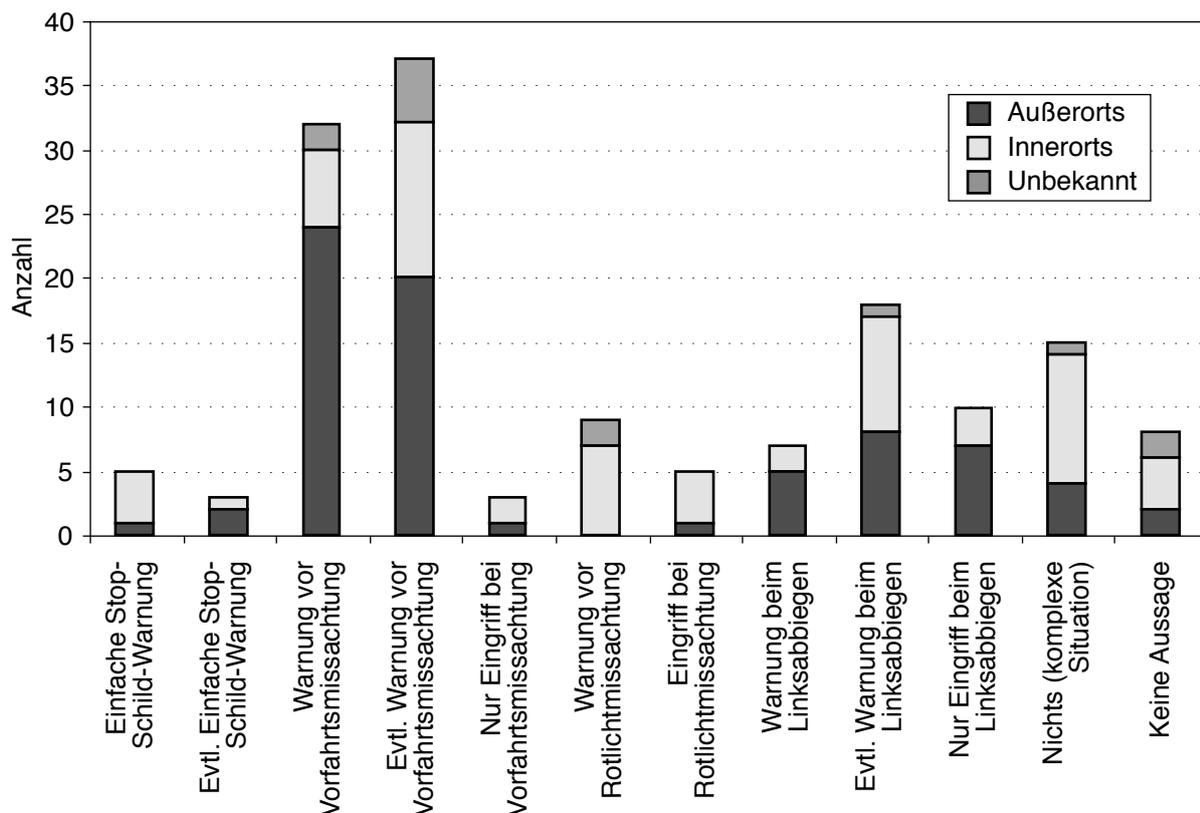


Bild 3-11: Verteilung der Kreuzungsunfälle der BMW-Unfalldatenbank hinsichtlich möglicher Aktiver Sicherheitssysteme und Systemhandlungen.

Zu der Art des Aktiven Sicherheitssystems, das den Unfall hätte verhindern können, wurde die Verletzungsschwere der beteiligten Personen ausgewertet (Bild 3-12). Dazu wurde die AIS-Skala benutzt (Abbreviated Injury Scale vgl. [ABBREVIATED INJURY SCALE, 2006] und [APPEL ET AL. 2002, S. 52]), bei der jede Einzelverletzung mit einer Verletzungsschwere von 0 bis 6 bewertet wird. In Unfallstatistiken wird oft der MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale) angegeben, die schwerste einzelne Verletzung einer Person. In der vorliegenden Auswertung wurde der größte MAIS-Wert der am Unfall beteiligten Personen berücksichtigt, also die schwerste Einzelverletzung, die im Rahmen des Unfalls auftrat. So wurde für jeden Unfall unabhängig von der Anzahl der beteiligten Personen genau ein Wert berücksichtigt.

Besonders hohe Verletzungsschweren treten bei den Unfällen auf, bei denen angenommen wurde, dass nur ein aktiver Eingriff den Unfall hätte verhindern können, da hier besonders hohe Kollisionsgeschwindigkeiten auftreten. Beim Linksabbiegen ist die Verletzungsschwere dagegen etwa gleich groß, egal ob ein autonomer Eingriff nötig gewesen wäre oder nicht. Dies erscheint plausibel, da die Geschwindigkeit des abbiegenden Fahrzeugs im Vergleich zum entgegenkommenden Fahrzeug meist gering ist. Die Gesamtenergie des Unfalls unterscheidet sich in den beiden Fällen kaum. Die Verletzungsschwere ist bei den Einbiegen/Kreuzen-Unfällen (Vorfahrtsmissachtung) höher als beim zweithäufigsten Unfalltyp, dem Linksabbiegen. Dies ist mit den häufiger ungünstigeren Kollisionswinkeln begründbar. Innerorts sind die Verletzungsschweren aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeiten insgesamt deutlich geringer als außerorts.

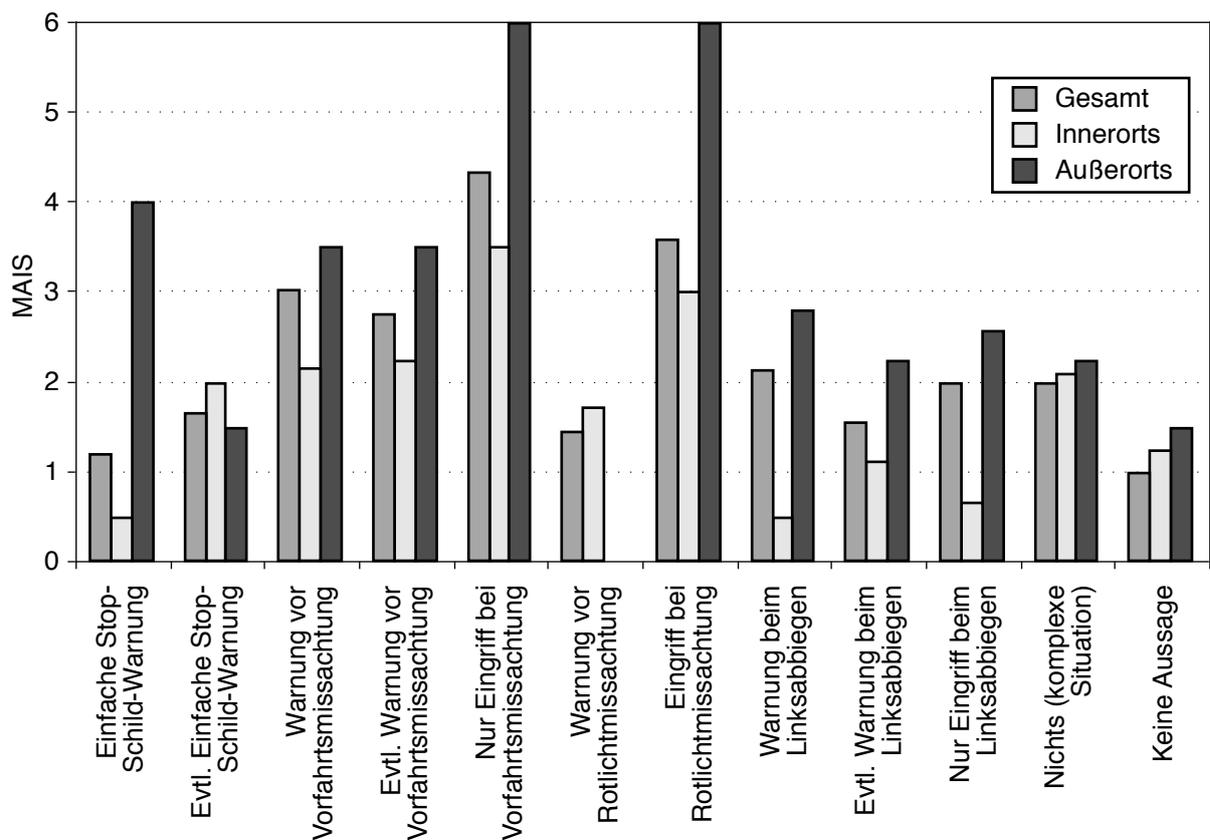


Bild 3-12: Durchschnittliche Verletzungsschwere der Kreuzungsunfälle der BMW-Unfalldatenbank aufgegliedert nach möglichen Assistenzsystemen.

Zusätzlich zur Verletzungsschwere wurde die Komplexität der Verkehrssituation in den einzelnen Fällen ausgewertet (Bild 3-13). Dabei wurden folgende Kategorien unterschieden:

- **Komplexe Situation:**
Mehrspurige Fahrbahnen in der Kreuzung oder hohe Verkehrsdichte oder hohe Anforderungen an die Spurführung oder unübersichtliche Kreuzung
- **Mittel komplexe Situation:**
Größere Kreuzung (z.B. an einer Bundesstraße) aber kein Hinweis auf höhere Verkehrsdichte oder ungünstige Umwelbedingungen

3. Unfallanalyse

- Einfache Situation:
Kleine übersichtliche Kreuzung, beim Linksabbiegen auch Bundesstraße mit Abbiegespur
- Keine Aussage

Die Auswertung zeigt deutlich, dass der Großteil der Unfälle aus einfachen Situationen resultiert. Die zu komplexen Situationen gehörenden Unfallursachen, Überforderung oder schlechte Sicht, spielen nur eine geringe Rolle.

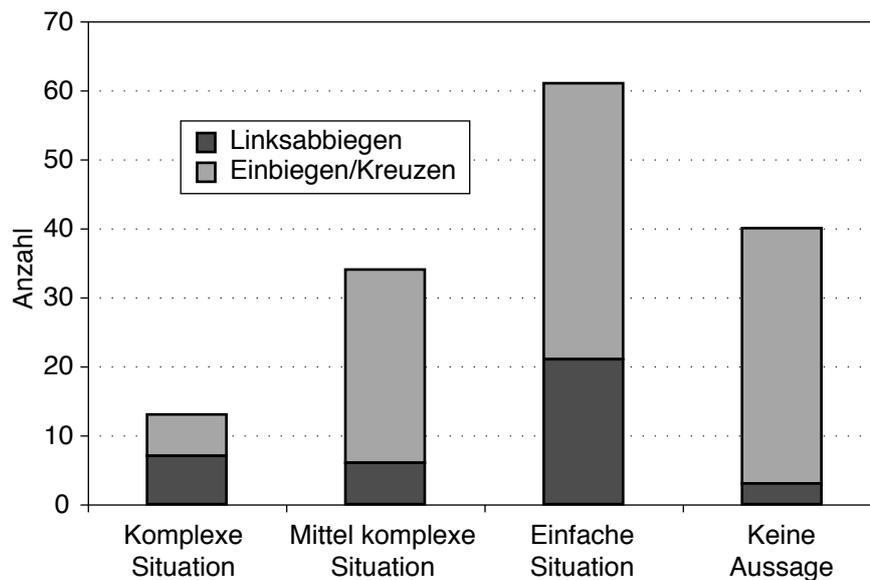


Bild 3-13: Komplexität der Situationen beim Einbiegen/Kreuzen und Linksabbiegen bei der BMW-Unfalldatenbank.

Die Zahl der einzeln untersuchten Unfälle ist für eine Tendenzaussage durchaus ausreichend, auch wenn die Fälle der BMW-Datenbank nicht ohne weiteres auf das gesamte deutsche Unfallgeschehen übertragbar sind. Bekannte deutliche Einflüsse wurden bei der Analyse bereits berücksichtigt. So wurden z.B. keine Unfälle mit Fahrzeugen bei einem Blaulichteinsatz ausgewertet. Im Untersuchungsgebiet (Bayern) werden zu einem großen Teil BMW-Fahrzeuge bei der Polizei eingesetzt, wodurch Unfälle mit Einsatzfahrzeugen bezogen auf das gesamte Unfallgeschehen in der Datenbank überrepräsentiert sind.

3.3 Auswahl relevanter Situationen

Zur Auswahl relevanter Situationen für Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen wurden Daten der beschriebenen Quellen und Auswertungen benutzt. Die einzelnen Methoden der Analyse des Unfallgeschehens ergeben dabei folgende Aussagen:

- Die Bundesunfallstatistik zeigt, dass Kreuzungsunfälle relevant sind. Es ist aufgrund der Einführung und weiteren Verbreitung von Aktiven Sicherheitssystemen für andere häufige Unfalltypen damit zu rechnen, dass die Relevanz in Zukunft noch zunehmen wird.
- Bei der Expertenbefragung in Form eines Brainstormings werden Einbiegen-/Kreuzen-Unfälle, Linksabbiegeunfälle und mehrspuriges Abbiegen häufig genannt. Ein großer Teil der detailliert aufgezeichneten Situationen ist komplex.
- Die Auswertung der GIDAS-Datenbank durch die VW-Unfallforschung zeigt, dass Einbiegen/Kreuzen an Kreuzungen mit dem Schild „Vorfahrt gewähren“ (Zeichen 205 der StVO) und Linksabbiegen die häufigsten Unfalltypen bei Kreuzungen sind, bei Einbiegen/Kreuzen-Unfällen an Kreuzungen mit Stop-Schildern (Zeichen 206 StVO) schwere Unfälle jedoch besonders wahrscheinlich sind. Die GIDAS-Auswertung legt Aktive Sicherheitssysteme für die Unfalltypen Einbiegen/Kreuzen, besonders an Stop-Schildern und für Linksabbiegen nahe.
- Die Einzelunfallanalyse der BMW-Unfalldatenbank zeigt, dass Aktive Sicherheitssysteme gegen Fehler beim Einbiegen/Kreuzen und beim Linksabbiegen die größte Anzahl an Kreuzungsunfällen verhindern können. Es gibt aber einen Teil von Kreuzungsunfällen, der sich potentiell mit einer einfachen Stop-Schild-Warnung verhindern lässt. Ein großer Teil der Unfälle entsteht aus einfachen Situationen. Die Auswertung legt Aktive Sicherheitssysteme für Einbiegen/Kreuzen, Linksabbiegen und eine Einfache Stop-Schild-Warnung nahe.

Ein Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Methoden zeigt, dass sie sich in der Detailliertheit und Repräsentativität gut ergänzen und bei den Aussagen für Aktive Sicherheitssysteme Schnittmengen vorhanden sind. Auffallend ist der Unterschied bei den Aussagen zur Komplexität der Situation zwischen der Expertenbefragung und der Einzelunfallanalyse. Dies kann auf die in 3.2.1 gezeigte Überbewertung von komplexen Situationen bei der Befragung zurückgeführt werden, jedoch auch auf ein subjektives Gefährdungsempfinden bei komplexen Situationen, das wesentlich höher als die objektive Gefährdung sein kann. Eine starke Differenz zwischen subjektiver und objektiver Gefährdung bei Autofahrern wird auch bei ELLINGHAUS, STEINBRECHER [2004 S. 196] genannt.

Die durchgeführte Einzelunfallanalyse ordnet die Unfälle bereits grob beschriebenen Systemen zu, das heißt, die Ableitung von Systemen geschieht hier schon bei der Unfallanalyse. Die Einzelunfallanalyse ist deshalb für die Top-Down-Entwicklung besonders geeignet. Zwei der bei der Einzelunfallanalyse beschriebenen Systeme wurden zur prototypischen Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt. Umgesetzt wurden die einfache Stop-Schild-Warnung als Stop-Schild-Assistenz (Kapitel 4) und der Schutz beim Linksabbiegen als Linksabbiegeassistentz (Kapitel 5). Dabei wurden neben den Ergebnissen der Unfallanalyse auch Machbarkeitsüberlegungen entsprechend des Entwicklungsprozesses in Kapitel 2.5 mit einbezogen.

Die Stop-Schild-Assistenz wurde als erstes System umgesetzt, da die zu analysierende Verkehrssituation verhältnismäßig einfach ist, weil im wesentlichen keine anderen Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden müssen. Es besteht auch die Möglichkeit Teile der Situationsinterpretation auf die ähnlichen Verkehrssituationen bei den Systemen „Schutz vor Rotlichtmissachtung“ und „Schutz vor Vorfahrtsmissachtung“ zu übernehmen.

3. Unfallanalyse

Die Linksabbiegeassistenz hat weniger Unfallvermeidungspotential als ein Schutz vor Vorfahrtsmissachtung beim Einbiegen/Kreuzen, die Anforderungen an die Umgebungserfassung wurden aber als besser umsetzbar angesehen, da nur entgegenkommende Verkehrsteilnehmer erfasst werden müssen.

4 Die Stop-Schild-Assistenz

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekts INVENT (Intelligenter Verkehr und Nutzergerechte Technik) [INVENT 2006] wurde der Prototyp einer Stop-Schild-Assistenz entwickelt. Das System verhindert das versehentliche Überfahren von Stop-Schildern indem das Fahrerverhalten bei der Annäherung an das Stop-Schild interpretiert wird. Bei Fehlverhalten wird der Fahrer gewarnt.

4.1 Unfalltyp und Systemdefinition

4.1.1 Unfalltyp

Die Einzelunfallanalyse der BMW-Unfalldatenbank (siehe 3.2.4) zeigt, dass bei Kreuzungen, an denen die Vorfahrt durch Stop-Schilder (Zeichen 206 StVO) geregelt wird, zwei Versionen des Unfalltyps „Einbiegen/Kreuzen“ unterschieden werden können. Der häufigere Unfalltyp entspricht dem Unfalltyp „Einbiegen/Kreuzen“ wie er auch an Kreuzungen zu finden ist, bei denen die Vorfahrt durch das Schild „Vorfahrt gewähren“ (Zeichen 205 StVO) geregelt ist. In 3.2.4 werden deshalb Unfälle an Kreuzungen mit beiden Beschilderungen zu dem Unfalltyp „restliches Einbiegen/Kreuzen“ hinzugezählt. Der zweite Unfalltyp, „Stop-Schild-Durchfahrt“ ist in 3.2.4 unter dem zugehörigen Assistenzsystem „Einfache Stop-Schild-Warnung“ aufgeführt.

Beim Typ „restliches Einbiegen/Kreuzen“ erkennen die verursachenden Fahrer die Vorfahrtsituation und verringern entsprechend ihre Geschwindigkeit oder halten an. Dann aber biegen sie in die vorfahrtsberechtigten Straße ein bzw. kreuzen diese, obwohl es aufgrund eines vorfahrtsberechtigten Fahrzeugs nicht möglich ist, und es kommt zum Unfall. Nach der Fahraufgabenklassifikation von FASTENMEIER, GSTALTER [2002, S.39] erfüllen die verursachenden Fahrer die Fahraufgaben „Entdecken von querenden Fahrzeugen“ oder „Beurteilen zeitlich-räumlicher Konstellationen“ nicht.

Im Gegensatz dazu interpretieren die Fahrer beim zweiten Unfalltyp die Vorfahrtsituation falsch und verhalten sich, als wären sie selbst vorfahrtsberechtigt, d.h. sie queren die Kreuzung mit hoher Geschwindigkeit. Die Fahraufgaben nach FASTENMEIER, GSTALTER, die hier nicht erfüllt werden, sind entweder „Entdecken der Verkehrsregelung“, „Dekodieren der Information“ oder „Abruf von im Langzeitgedächtnis gespeicherten Informationen“. Folge dieser Fehler ist immer ein Fehler bei der Fahraufgabe „Erwarten von vorfahrtsberechtigtem Querverkehr“, das heißt, der Querverkehr wird gar nicht erst beachtet und die Kreuzung gequert. Kommt es in dieser Situation zum Zusammenstoß mit dem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug, ist die Unfallschwere im Verhältnis meist hoch, da beide beteiligten Fahrzeuge eine hohe Energiemenge eintragen. Die genannten Unfallursachen und Fehler werden durch Zeugenaussagen, die bei der Einzelunfallanalyse ausgewertet wurden, bestätigt.

Der wesentliche Unterschied der beiden Unfalltypen aus der Sicht eines Aktiven Sicherheitssystems ist, dass bei der Stop-Schild-Durchfahrt der verursachende Fahrer ein für die unveränderlichen örtlichen Gegebenheiten, nämlich der Pflicht anzuhalten und Vorfahrt zu gewähren, falsches Fahrverhalten zeigt, während beim Unfalltyp „restliches Einbiegen/Kreuzen“ das Fahrerverhalten zwar an die unveränderlichen Gegebenheiten angepasst ist, nicht aber an die aktuelle Verkehrssituation. Ein Aktives Sicherheitssystem für den Unfalltyp „restliches Einbiegen/Kreuzen“ benötigt Informationen über die aktuelle Verkehrssituation, um den Fehler des Fahrers zu erkennen. Beim Unfalltyp Stop-Schild-Durchfahrt genügen Informationen der unveränderlichen örtlichen Gegebenheiten, da der Fehler unabhängig von der aktuellen Verkehrssituation ist.

4.1.2 Systemdefinition und Funktionsweise

Der Stop-Schild-Assistent wird aktiviert, wenn sich der Fahrer einer Kreuzung nähert und dort durch das Zeichen 206 der StVO nicht vorfahrtsberechtigt ist. Aus der Beobachtung des Fahrerverhaltens und der Entfernung zur Halteposition unterscheidet der Assistent, ob sich der Fahrer wie bei der Annäherung an ein Stop-Schild (korrektes Verhalten) oder wie auf einer vorfahrtsberechtigten Straße (Fehlverhalten) verhält. Im Fall eines Fehlers des Fahrers handelt der Assistent. Bei der Handlung reicht die mögliche Bandbreite von der Information bis zur autonomen Notbremsung (siehe 4.2.1), wobei eine Warnung bevorzugt wird.

Der Stop-Schild-Assistent wird nur bei Kreuzungen mit Stop-Schild aktiviert. Es kann vermutet werden, dass es auch bei Kreuzungen mit dem Zeichen 205 der StVO Unfälle mit vergleichbarer Ursache gibt, jedoch ist in diesem Fall korrektes und fehlerhaftes Fahrerverhalten nicht immer unterscheidbar. So kann ein Fahrer im Rahmen der StVO eine Kreuzung mit Zeichen 205 aus nicht vorfahrtsberechtigter Richtung auch ohne Verminderung der Geschwindigkeit überqueren, wenn sich auf den vorfahrtsberechtigten Kreuzungszufahrten keine Fahrzeuge nähern und die Kreuzung sehr übersichtlich ist. Dieser Fall ist für den beschriebenen Stop-Schild-Assistenten nicht von dem Fall zu unterscheiden, bei dem der Fahrer die Vorfahrtssituation falsch interpretiert. Eine fehlerhafte Auslösung (False-Positive) ist in diesem Fall unvermeidlich. Bei Kreuzungen mit Zeichen 206 verlangt die StVO aber das Abbremsen bis zum Stillstand. Das Überqueren einer solchen Kreuzung mit unverminderter Geschwindigkeit stellt einen deutlichen Verstoß gegen die StVO dar. Es ist anzunehmen, dass eine Auslösung des Assistenten in diesem Fall von den meisten Fahrern akzeptiert wird.

4.1.3 Machbarkeitsüberlegung

Ziel der Machbarkeitsüberlegung ist, abzuschätzen, ob die zu erwartenden Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung und Aktorik in einem Serienfahrzeug denkbar sind.

Hauptteil der Fahrumgebungserfassung des Stop-Schild-Assistent ist die Erfassung und Entfernungsmessung zum Stop-Schild. Dafür sind, abhängig von der benötigten Genauigkeit, verschiedene technische Lösungen verfügbar (siehe auch 4.4.4). Für manche Lösungen werden Sensoren benutzt, die auch in anderen Fahrerassistenzsystemen eingesetzt werden.

Die Aktorik besteht im Fall eines autonom eingreifenden Systems aus einer automatischen Bremsbetätigung. Sie ist bereits in heutigen DSC/ESP-Systemen vorhanden. Bei einem warnenden Sy-

stem muss eine Möglichkeit gegeben sein, die Warnung an den Fahrer abzusetzen. Für akustische und optische Warnungen sind Lösungen hierfür bereits in Serienfahrzeugen verfügbar.

Die Machbarkeitsüberlegung zeigt, dass die Fahrumgebungserfassung und die Aktorik für das Aktive Sicherheitssystem Stop-Schild-Assistenz realisierbar sind.

4.2 Situationsinterpretation

4.2.1 Warndilemma

Der richtige Handlungszeitpunkt für eine Aktion des Stop-Schild-Assistenten ist von der Art der Handlung und der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig. Aus der aktuellen Geschwindigkeit v_{ego} kann bei Annahme einer konstanten Verzögerung a_b der Bremsweg s_b berechnet werden.

$$s_b = \frac{v_{ego}^2}{2a_b}$$

Soll das Fahrzeug an der Haltelinie zum Stillstand kommen, muss die konstante Verzögerung a_b ab der Entfernung zur Haltelinie d_{stop} wirken, ab der die Bedingung $d_{stop} = s_b$ gilt. Spätestens zu diesem Zeitpunkt muss bei einem automatisch und ohne Zeitverzug mit der Verzögerung a_b eingreifenden Assistenzsystem die Entscheidung fallen, ob ein Eingriff stattfindet. Ein späterer Eingriff, bei dem $d_{stop} < s_b$ gilt, ist nicht wirksam, da das Fahrzeug nicht mehr vor der gewünschten Halteposition zum Stillstand kommt. Ein tatsächlicher Notbremsvorgang, gleich ob automatisch oder vom Fahrer durchgeführt, weist keine konstante Verzögerung auf. Die Vereinfachung einer konstanten Verzögerung ist hier zulässig, da die durch sie verursachte Ungenauigkeit geringer ausfällt, als die Ungenauigkeit, die durch die Unsicherheit über den Reibwert zwischen Reifen und Straße verursacht wird. Die Vorgehensweise schließt eine genauere Berechnung des Bremswegs s_b nicht aus.

Bei einem warnenden Aktiven Sicherheitssystem muss die Reaktionszeit des Fahrers bei der Bestimmung des richtigen Handlungszeitpunktes berücksichtigt werden. Unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit während der Reaktionszeit t_r gilt für den Reaktionsweg s_r :

$$s_r = v_{ego} \cdot t_r$$

Die Vereinfachung einer konstanten Geschwindigkeit ist hier zulässig, da die Unsicherheit bezüglich der Reaktionszeit des Fahrers größer ist als die Auswirkungen einer nicht konstanten Geschwindigkeit v_{ego} . Der gesamte Anhalteweg für die Verzögerung nach einer Warnung ist $s_a = s_b + s_r$. Die Warnung muss spätestens zu dem Zeitpunkt erfolgen, an dem gilt:

$$d_{stop} = s_a$$

4. Die Stop-Schild-Assistenz

Bei einem warnenden Aktiven Sicherheitssystem muss zu diesem letzten Warnzeitpunkt die Entscheidung fallen, ob gewarnt wird oder nicht. Erfolgt die Warnung später, d.h. wenn $d_{stop} < s_a$, kann der Fahrer das Fahrzeug nicht mehr vor der Haltelinie zum Stillstand bringen, vorausgesetzt, die Annahmen über t_r und a_b treffen zu.

Der Unterschied zwischen einem warnenden und einem praktisch verzögerungsfrei eingreifenden autonomen System besteht darin, dass das autonome System erst an der physikalischen Grenze handeln muss. Auch der Fahrer muss spätestens zu diesem letztmöglichen Bremszeitpunkt handeln, d.h. mit a_b verzögern, um noch an der Haltelinie zum Stillstand zu kommen. Ein warnendes System muss jedoch schon in einer Entfernung handeln, die um s_r größer ist. An diesem Punkt hat das System keine Information über das beabsichtigte Verhalten des Fahrers bis zum letzten Bremspunkt. Ein sportlicher Fahrer kann bewusst sehr lange mit einer Reaktion auf das Stop-Schild warten, aus der sich ein korrektes Verhalten erkennen lässt (hier als „messbare Reaktion“ bezeichnet). Die messbare Reaktion kann durchaus erst nach dem letztmöglichen Warnpunkt liegen (vgl. Bild 4-2), im Extremfall erst am letztmöglichen Bremspunkt. Eine Fahrerverhaltensanalyse kann in diesem Fall am letzten Warnpunkt nicht unterscheiden, ob das Stop-Schild erkannt wurde oder nicht. Eine Fehlwarnung (False Positive) ist zwangsläufig die Folge.

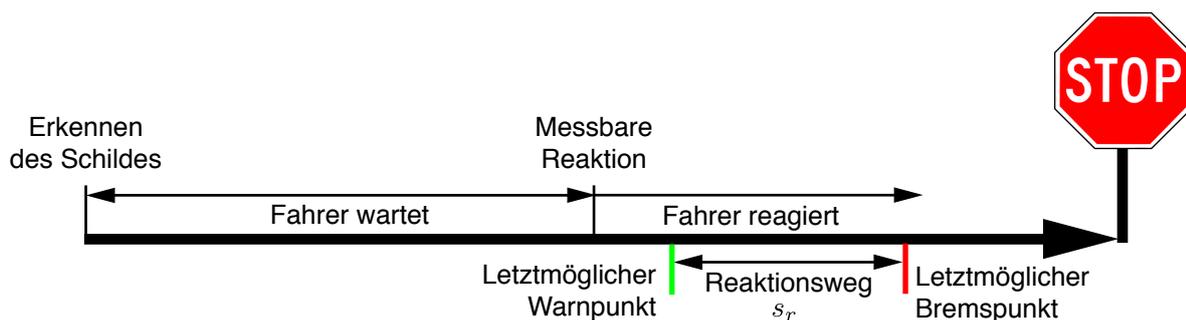


Bild 4-1: Annäherung an ein Stop-Schild: Fahrerreaktion für ein Warnsystem erkennbar

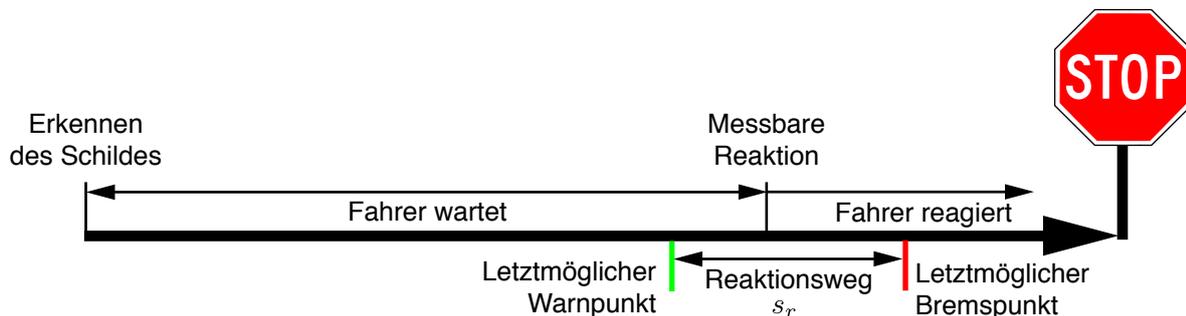


Bild 4-2: Annäherung an ein Stop-Schild. Fahrerreaktion für ein Warnsystem nicht erkennbar

Die Problematik, dass die Entscheidung über eine Warnung zu einem Zeitpunkt fallen muss, an dem korrektes und fehlerhaftes Fahrerverhalten nicht immer unterscheidbar sind, wird als „Warn-dilemma“ bezeichnet.

Bild 4-3 zeigt den Bereich der Reaktionsmöglichkeit, der für den Fahrer theoretisch besteht. Im Diagramm sind letztmöglicher Bremspunkt und letztmöglicher Warnpunkt (Abstand zur Halte­linie) im Verhältnis zur Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen. Die Entscheidung über Warnung bzw. autonome Bremsung muss an der Stelle fallen, an der ein eingezeichneter Geschwindigkeitsverlauf die Warnkurve bzw. Bremskurve schneidet ($d_{stop} = s_a$ bzw. $d_{stop} = s_b$). Zusätzlich sind zwei exemplarische Geschwindigkeitsverläufe aus Fahrversuchen eingezeichnet. Bei dem langsamen Fahrer ist vor dem Schnittpunkt mit der Warnkurve eine deutliche Verringerung der Geschwindigkeit zu sehen. Eine Fahrerverhaltensinterpretation kann diese erkennen. Beim sportlichen Fahrer ist keine Verringerung der Geschwindigkeit bis zum Schnittpunkt mit der Warnkurve zu erkennen. Hier ist eine Fehlinterpretation und damit eine Fehlwarnung möglich.

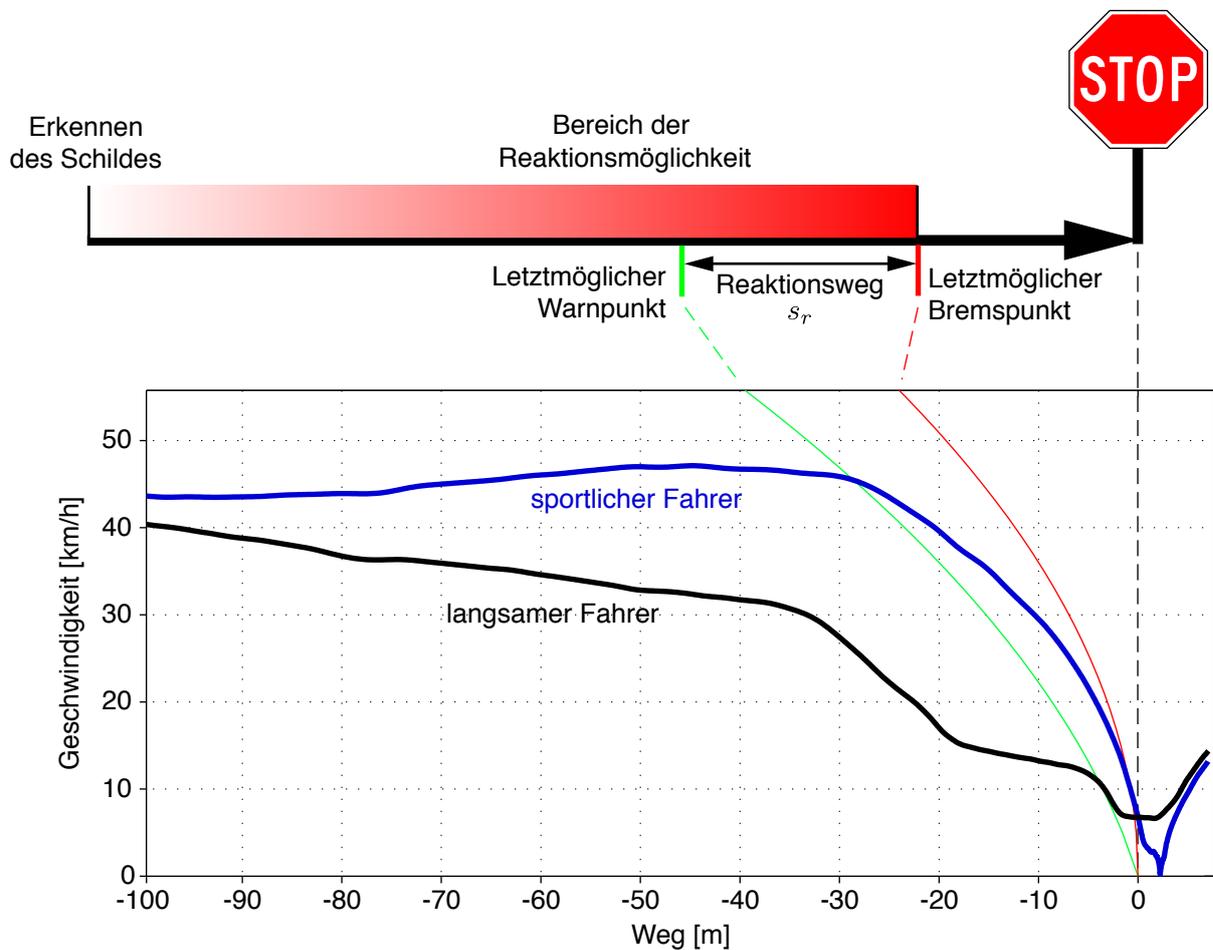


Bild 4-3: Letzter Brems- und Warnpunkt beim Stop-Schild-Assistent und unterschiedliche Fahrerverhalten

Die Umsetzbarkeit eines warnenden Aktiven Sicherheitssystems ist durch das Warndilemma generell in Frage gestellt. Das korrekte Fahrerverhalten ist in der Situation Stop-Schild-Annäherung um mehrere Größenordnungen häufiger als ein fehlerhaftes Verhalten. Die absolute Anzahl der False-Positive-Fehler wird deshalb bei vergleichbarer Fehlerhäufigkeit wesentlich größer sein als die der False-Negative-Fehler (keine Systemreaktion trotz Fehler des Fahrers) und ist somit wesentlich für die Qualität des Systems. False-Positive-Warnungen bringen nicht nur eine Gefährdung des Verkehrs durch eine mögliche Überreaktion mit sich, auch die Akzeptanz des Assistenzsystems beim

Fahrer sinkt. Ob ein warnendes System trotzdem umsetzbar ist, hängt von der tatsächlichen Spanne der korrekten Fahrerreaktionen ab, die in der Situation auftritt, in der das Aktive Sicherheitssystem wirken soll. Reagiert ein erheblicher Teil der Fahrer erst nach dem letztmöglichen Warnpunkt, ist eine hohe Anzahl von Fehlwarnungen unvermeidlich und das System nicht als Warnsystem darstellbar (Bild 4-4). Ist die Anzahl der messbaren Reaktionen der Fahrer, die erst nach dem letzten Warnpunkt auftreten, jedoch minimal und die tatsächliche Reaktionsspanne vor dem letztmöglichen Warnpunkt (Bild 4-5), kann der Anteil der Fehlwarnungen minimiert werden.

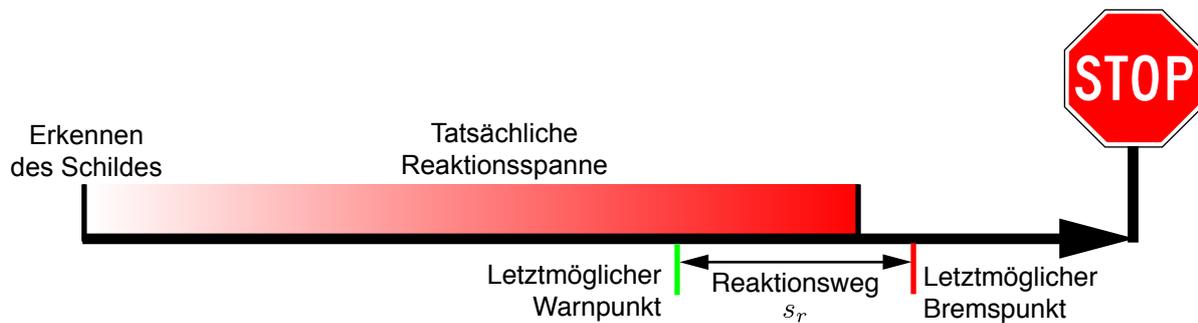


Bild 4-4: Warndilemma: Machbarkeit des Systems nicht gegeben

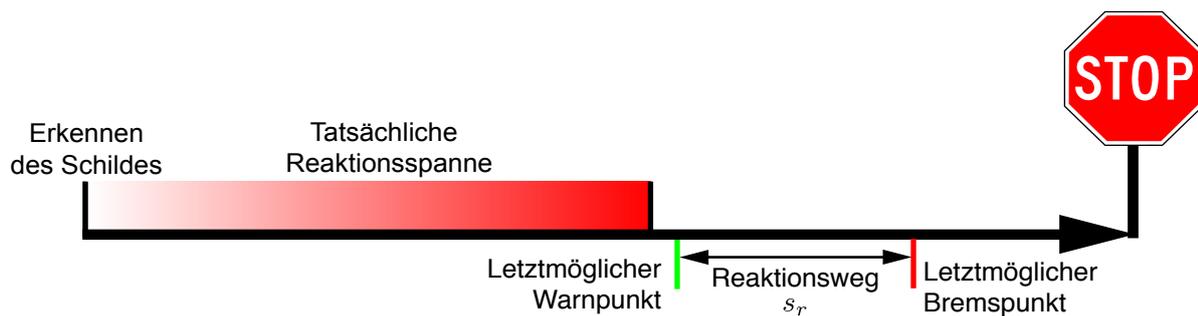


Bild 4-5: Warndilemma: Machbarkeit des Systems gegeben

4.2.2 Vorversuche zur Fahrerhaltensanalyse

Die tatsächliche Reaktionsspanne bei der Annäherung an Stop-Schilder wurde durch Fahrversuche im Realverkehr untersucht. Dabei wurde eine Versuchsstrecke im Nordosten von München festgelegt. Auf einer Länge von 87 km sind 16 Stop-Schilder zu passieren, davon drei außerhalb geschlossener Ortschaften. Die Strecke wurde in einem ersten Versuch von sechs Versuchspersonen durchfahren, so dass abzüglich fehlerhafter Messungen 90 verwertbare Annäherungen zur Verfügung standen. Während der Annäherung an die Stop-Schilder wurden die Fahrzeugdaten aufgezeichnet, die dem Stop-Schild-Assistenten zur Verfügung stehen:

- Zeitsignal
- Fahrzeuggeschwindigkeit

- Beschleunigung
- Gaspedalstellung
- Bremsdruck
- Lenkwinkel

Die Position der Haltelinie wurde vom Versuchsleiter während der laufenden Datenaufzeichnung durch einen Tastendruck manuell gesetzt, da eine genaue automatische Positionsbestimmung auf der gesamten Versuchsstrecke nicht zur Verfügung stand. Zusätzlich wurde vom Versuchsleiter ein Informationsbit gesetzt, das zeigt, ob ein Vorderfahrzeug bei der Annäherung vorhanden war. Aus dem Geschwindigkeitssignal wurde ein Wegsignal berechnet. Somit konnte für jeden Zeitpunkt der Aufzeichnung der Abstand zur Haltelinie bestimmt werden.

Während der gesamten Versuchsreihe trat, wie zu erwarten, keine Stop-Schild-Durchfahrt auf. Als Ersatz für fehlerhaftes Fahrerverhalten wurden zusätzlich zu den 16 Annäherungen an Stop-Schilder sechs Überquerungen von Kreuzungen bei eigener Vorfahrt aufgezeichnet. Es wird angenommen, dass das Fahrerverhalten bei diesen Kreuzungsüberquerungen weitgehend mit dem bei einer Stop-Schild-Durchfahrt vergleichbar ist, da in beiden Fällen die Fahrer, zu Recht oder zu Unrecht, denken, sie hätten Vorfahrt.

Für die Berechnung des Anhaltewegs s_a wurde eine Reaktionszeit des Fahrers $t_r = 1$ s und eine konstante Verzögerung von $a_b = 6$ m/s² bis zum Stillstand gewählt. Verschiedene Untersuchungen, die bei BURCKHARDT [1985] verglichen werden, zeigen, dass mehr als 70% der Fahrer innerhalb der Reaktionszeit von 1s auf ein unvorhergesehenes Ereignis reagieren. Die gewählte Reaktionszeit wurde über die durchgeführten Simulatorversuche (siehe 4.5.1) überprüft.

Die Versuchsdaten der Vorversuche zeigen, dass bei dem allergrößten Teil der Annäherungen an Stop-Schilder vor dem letzten Warnzeitpunkt Fahrerhandlungen vorliegen, die als Reaktion auf das Stop-Schild zu werten sind. Bild 4-6 zeigt als Beispiel die Versuchsergebnisse für die unterschiedlichen Annäherungen an ein Außerorts-Stop-Schild. In allen Fällen ist zu erkennen, dass vor dem letzten Warnpunkt (Schnitt der jeweiligen Geschwindigkeitskurve mit der Kurve des Anhaltewegs) eine deutliche Reaktion auf das Stop-Schild erfolgt. Dies ist auch bei sportlichem Fahrverhalten mit Verzögerungen am Rand des Komfortbereichs (größer als 5 m/s²) der Fall.

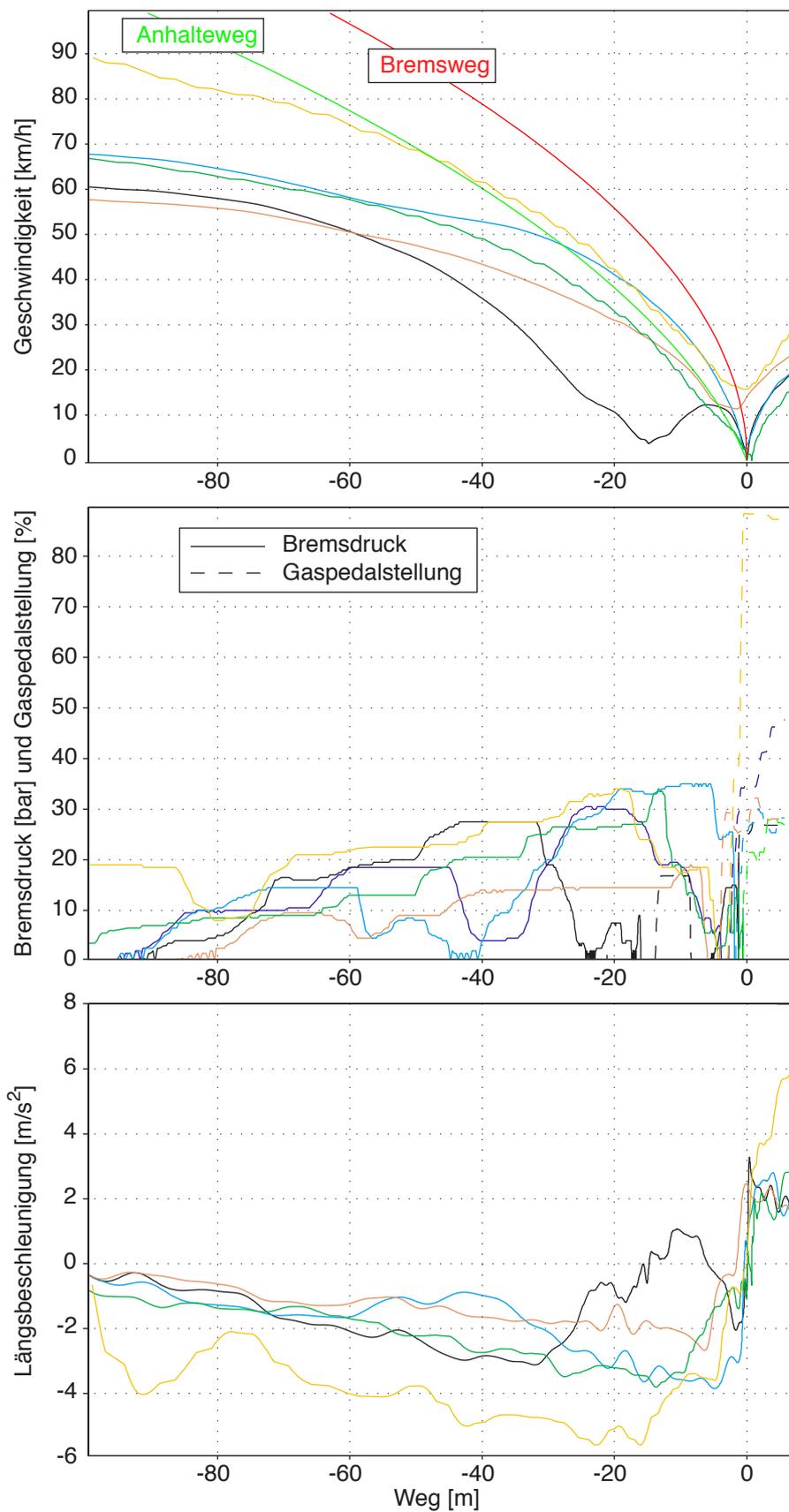


Bild 4-6: Versuchsergebnisse: Beispiele verschiedener Annäherungen an eine Außerorts-Stop-Kreuzung

Die Ergebnisse der Vorversuche sind mit den Ergebnissen der Versuche von LLOYD ET AL. [1997 S. 66] vereinbar, bei denen die Erkennbarkeit des Fahrerverhaltens aus den Fahrereingaben (Fahrpedal, Bremsbetätigung, Lenkradwinkel) untersucht wurde.

Letztlich ist aus den Vorversuchen erkennbar, dass die Fahrerreaktionen so früh erfolgen und das Warndilemma bei der Stop-Schild-Assistenz so selten auftritt, dass die prinzipielle Machbarkeit mit einer Warnung als Systemhandlung gegeben ist.

Die Versuchsergebnisse wurden neben der Abschätzung der Machbarkeit zur Entwicklung und Bewertung der Fahrerverhaltensanalyse benutzt.

4.2.3 Fahrerverhaltensanalyse mit analytischer Lösung

Die Fahrverhaltensanalyse wurde mit dem Software-Rapid-Prototyping-Werkzeug MatLab/Simulink implementiert. Dies erlaubt sowohl die Applikation in einer Simulink-Umgebung mit aufgezeichneten Fahrdaten aus den Fahrversuchen zu prüfen als auch die Applikation mittels Real-Time-Workshop in C-Code zu wandeln und in verschiedenen Plattformen wie der Fahrsimulationsumgebung (vgl. 4.5.1) oder Echtzeithardware (vgl. 4.5.2) einzubinden.

Aufgabe der Fahrerverhaltensanalyse ist die Unterscheidung zwischen korrektem und fehlerhaftem Fahrerverhalten (Stop-Schild-Durchfahrt). Die Entscheidung über eine Warnung wird dabei generell bei Erreichen des letzten Warnpunkts ($d_{stop} = s_a$) gefällt. Der Kern der Fahrerverhaltensanalyse sind mehrere Teilsysteme, „Beobachter“ genannt, die die Fahrdaten auf die Einhaltung eines jeweiligen Kriteriums überprüfen.

Die Ergebnisse der verschiedenen Beobachter werden gewichtet addiert (vgl. Bild 4-7). Ein Schwellwertschalter gibt je nach Größe der gewichteten Summe ein Warnsignal aus oder nicht. Eine Positionsbestimmung berechnet die Entfernung zum letzten Warnpunkt aus den Positionsdaten und den Fahrdaten. Ist der letzte Warnpunkt erreicht, wird das Signal vom Schwellwert-Schalter durchgeschaltet.

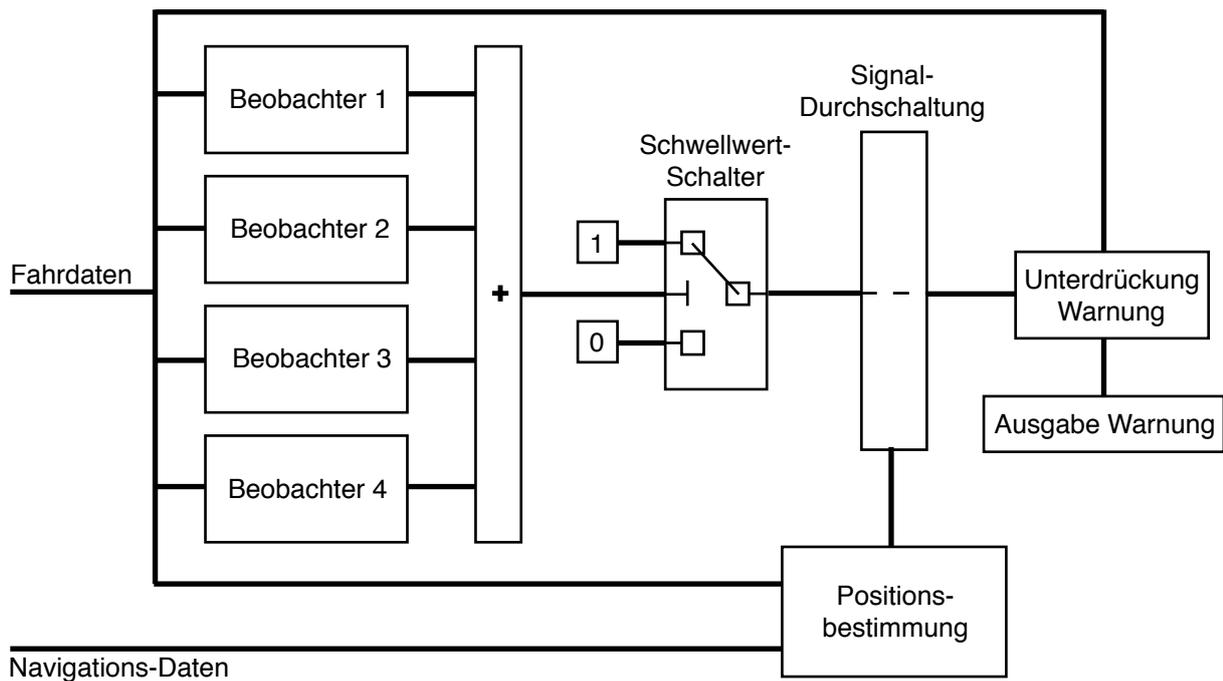


Bild 4-7: Aufbau der Situationsinterpretation beim Stop-Schild-Assistent

Folgende Kriterien werden beobachtet:

- **Geschwindigkeit sinkt:**
Durch den Vergleich zweier exponentieller gleitender Durchschnittswerte [MARKET MARKER 2006] der Eigengeschwindigkeit mit unterschiedlichem Wertungsfaktor wird ein Trend für die Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt. Sinkt die Geschwindigkeit um ein Mindestmaß, ist das Kriterium erfüllt.
- **Beschleunigung negativ:**
Ist die Beschleunigung über einen Mindestzeitraum negativ, ist das Kriterium erfüllt.
- **Bremspedal betätigt:**
Wurde innerhalb einer Betrachtungszeit das Bremspedal betätigt, ist das Kriterium erfüllt.
- **Geschwindigkeit verringert:**
Die aktuelle Geschwindigkeit wird durch die Maximalgeschwindigkeit in den letzten 150 Metern geteilt. Unterschreitet der Quotient einen Schwellwert, ist das Kriterium erfüllt.
- **Zuletzt Gas gegeben:**
Das Kriterium ist nur erfüllt, wenn die letzte Bremsbetätigung nach der letzten Gaspedalbetätigung stattgefunden hat.

Die Warnung wird unterdrückt, wenn bestimmte Situationen auftreten, oder generelle Randbedingungen nicht erfüllt sind, beispielsweise bei einer Entfernung von weniger als zwei Metern zur Haltelinie oder einer Geschwindigkeit kleiner 15 km/h. Die Bestimmung des letzten Warnpunktes ist bei kleineren Entfernungen oder Geschwindigkeiten nicht mehr sinnvoll, da die Entfernung des rechtlichen Anhaltepunktes (Haltelinie bzw. Stop-Schild) von der Sichtlinie bei vielen Kreuzungen

schon größer ist. Viele Fahrer halten in der Praxis bei solchen Kreuzungen entgegen der StVO nicht zuerst an der Haltelinie, sondern nur an der Sichtlinie an. Dabei würde in vielen Fällen vor der Haltelinie die Warnung ausgelöst, was als False-Positive zu werten wäre.

In der Warnungsunterdrückung wird ein Sonderfall einer möglichen False-Positive-Auslösung abgefangen. In Fällen, bei denen das Fahrzeug schon in größerer Entfernung zur Haltelinie angehalten oder stark verlangsamt wurde, beispielsweise, wenn eines oder mehrere Vorderfahrzeuge vor dem Stop-Schild warten, können die Beobachter am letzten Warnpunkt Werte liefern, die zu einer False-Positive-Auslösung führen. Diese Sondersituation wird erkannt und die Warnung unterdrückt.

4.2.4 Fahrerhaltensanalyse mit Neuronalem Netz

Die analytische Fahrerhaltensanalyse liefert bereits eine sehr hohe Erkennungsrate. Dennoch besteht Verbesserungspotential. Die Verknüpfung der Beobachter über eine gewichtete Summe kann nicht alle Fahrerhaltensweisen bei der Annäherung an ein Stop-Schild korrekt interpretieren. Viele der fehlerhaft interpretierten Fälle zeichnen sich durch bestimmte Muster in der Kombination der beschriebenen Beobachtkriterien oder vergleichbarer Kriterien aus. Ein Beispiel dafür ist der Sonderfall von einem oder mehreren Vorderfahrzeugen, der bei der analytischen Situationsinterpretation zu Fehlern führen würde und extra abgefangen werden muss. Die scharfen Kriteriengrenzen der Beobachter sind für die Analyse des unscharfen menschlichen Fahrerhaltens nicht optimal. Als Alternative zur analytischen Lösung wurde die Fahrerhaltensanalyse mit verschiedenen Neuronalen Netzen entwickelt.

4.2.4.1 Grundlagen Neuronale Netze und Fuzzy-Logik

Neuronale Netze versuchen den Aufbau und die Eigenschaften des menschlichen Gehirns auf künstliche Rechner zu übertragen. Neuronale Netze werden bei der Analyse verrauschter oder unscharfer Daten, in der Regelungstechnik oder bei der Approximierung von Funktionen benutzt. Sie werden nicht explizit für ein Problem programmiert, die gewünschten Eigenschaften werden ihnen anhand von Beispielen in einem Trainingsprozess angelehrt. Es existieren verschiedene Topologien von Neuronalen Netzen [KRATZER, 2003, S. 33]. Für die Fahrerhaltensanalyse wurden zwei Netze mit unterschiedlichen Topologien entwickelt.

Die erste der benutzten Topologien, der Neuro-Adaptive-Fuzzy-Regler [BERNT, 2005, S.29], stellt eine Verknüpfung von Neuronalen Netzen und Fuzzy-Logik dar. Fuzzy-Logik ist eine Verallgemeinerung der Booleschen Logik und lässt im Gegensatz zu dieser auch Werte zwischen 1 (wahr) und 0 (falsch) zu. Fuzzy-Logik ermöglicht das systematische Einbeziehen nicht perfekter Informationen in ein Modellsystem [KRUSE ET AL. 1995, S. 2]. Dabei ist kein exaktes mathematisches Modellwissen, sondern nur Wissen in Form linguistischer Regeln notwendig [NAUCK ET AL. 1994, S. 255], das in Zugehörigkeitsfunktionen übersetzt wird. Ein Beispiel für linguistische Regeln für die Fahrerhalteninterpretation ist: „Je stärker die Geschwindigkeit sinkt, desto eher hat der Fahrer das Stop-Schild bemerkt“. Für Fuzzy-Regler bestehen jedoch keine standardisierten Entwurfsverfahren, hier kann nur heuristisch vorgegangen werden. Die Kombination von Neuronalen Netzen und Fuzzy-Reglern erlaubt das Erlernen der Zugehörigkeitsfunktionen auf der Basis be-

kannter Lernverfahren für Neuronale Netze, wie beispielsweise Back-Propagation [NAUCK ET AL. 1994, S. 71].

Die zweite Topologie, lernende Vektorquantisierung (LVQ), beruht auf Wettbewerbslernen. Während Wettbewerbslernen ein unbeaufsichtigtes Lernverfahren ist [NAUCK ET AL. 1994, S. 95], stellt LVQ ein beaufsichtigtes Lernverfahren dar [DANNER 1995, S. 8]. Der Aufbau eines LVQ-Netzes besteht nur aus zwei Schichten, einer Eingabe- und einer Ausgabeschicht. Jedes Neuron der Ausgabeschicht enthält einen Gewichtsvektor. Ein angelegter Eingabevektor wird mit jedem Gewichtsvektor verglichen. Das Neuron des Gewichtsvektors mit der größten „Ähnlichkeit“ zum Eingabevektor, z.B. der geringsten euklidischen Distanz, wird aktiviert. Alle anderen Neuronen werden deaktiviert („Winner-Takes-It-All-Prinzip“, [NAUCK ET AL. 1997, S. 97]). Die Aktivierung wird durch eine Ausgabefunktion interpretiert und einer Klasse zugeordnet.

4.2.4.2 Zusätzliche Fahrversuche

Die Fähigkeit eines Neuronalen Netzes, die gewünschte Aufgabe zu erfüllen, hängt wesentlich von der Qualität der Trainingsdaten ab. Sind im Trainingsdatensatz nicht alle möglichen Systemzustände angemessen berücksichtigt, kann das Netz versagen [NAUCK ET AL. 1994, S. 254]. Um über einen ausreichenden Satz an Trainingsdaten zu verfügen, wurden weitere Versuche mit 20 Versuchspersonen auf der Stop-Schild-Versuchsstrecke (siehe 4.2.2) durchgeführt. Es standen so 395 Einzelannäherungen für das Training und den Test der Netze zur Verfügung, davon 92 Überfahrten von Vorfahrtskreuzungen als Ersatz für Stop-Schild-Durchfahrten, die auch bei dieser Versuchsreihe nicht vorkamen (vgl. 4.2.2).

4.2.4.3 Implementierung in MatLab/Simulink

Die Begutachtung und Auswahl der Trainingsdaten, das Training und der Test der Neuronalen Netze, wurde in einem eigens entwickelten MatLab-Programm mit grafischer Benutzeroberfläche auf Basis der Neural-Networks-Tool-Box durchgeführt [BERNT 2005, S. 35]. Die trainierten und getesteten Netze wurden in das Simulink-Modell des Stop-Schild-Assistenten integriert und einzeln oder parallel zur analytischen Fahrerverhaltensanalyse berechnet.

Die Eingangsvektoren der Neuronalen Netze bestehen aus Kriterien, die bei der Annäherung an das Stop-Schild berechnet werden. Diese Kriterien sind ähnlich den Kriterien der Beobachter bei der analytischen Fahrerverhaltensanalyse, liefern aber nicht boolesche Werte (Kriterium erfüllt oder nicht erfüllt), sondern reelle Werte.

Der Ausgangswert des Fuzzy-Netzwerks ist eine reelle Zahl. Die Soll-Ausgänge der Trainingsdaten wurden in der Prototyp-Implementierung zu 1 (Warnung) und 0 (keine Warnung) gesetzt, der Grenzwert, ab dem die Warnung ausgegeben wird, ist 0,5. Der reelle Ausgangswert bietet die Möglichkeit, ein Versagen des Fuzzy-Netzes bei einem Eingangsvektor zu erkennen, der nicht durch die Trainingsdaten berücksichtigt wurde (vgl. 4.2.4.2). In diesem Fall ist ein Ausgangswert weit außerhalb des Zielintervalls [0..1] wahrscheinlich und es kann dann eine alternative Methode zur Fahrerverhaltensanalyse benutzt werden.

Das LVQ-Netz liefert durch das Winner-Takes-It-All-Prinzip (vgl. 4.2.4.1) einen Ausgangswert, der einer exakten Klassifizierung, „Warnung“ oder „keine Warnung“, entspricht [BERNT 2005, S. 43].

4.2.4.4 Vergleich der Qualität der Fahrerhaltensanalysen

BERNT [2005, S.53] zeigt einen Vergleich der analytischen Fahrerhaltensanalyse mit drei verschiedenen Neuronalen Netzen, davon zwei unterschiedlich erzeugte Fuzzy-Logic-Netze und ein LVQ-Netz. Die Netze wurden mit den 395 Annäherungen der zusätzlichen Fahrversuche (vgl. 4.2.4.2) trainiert und getestet. Tabelle 4-1 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs. Der Trainings-Fehler der Fuzzy-Netze zeigt dabei die durchschnittliche Abweichung des Ergebnisses vom Soll-Wert. Der sehr geringe Trainings-Fehler des Fuzzy-Logic-Netzes 1 deutet darauf hin, dass das Netz übertrainiert ist. Das Netz bildet in diesem Fall die Trainingsdaten sehr exakt ab, bildet aber keine allgemeine Abbildungsvorschrift aus den Trainingsdaten aus. Bei Eingangsdaten, die nicht im Trainingsdatensatz sind, liefert das Netz eine schlechte Leistung [NAUCK ET AL. 1994, S. 80].

Tabelle 4-1: Vergleich der Fahrerhaltensanalysen mit trainierten Daten

System	False-Positive	False-Negative	Fehler gesamt	Fehler-Anteil [%]	Training-Fehler [%]
Fuzzy-Logic-Netz 1	0	0	0	0	0,002
Fuzzy-Logic-Netz 2	0	0	0	0	5,56
LVQ-Netz	0	4	4	1,01	n.v.
Analytisch	4	2	6	1,52	n.v.

Bei einem Test mit den Daten aus dem ersten Fahrversuch (siehe 4.2.2) und weiteren Versuchsdaten (insgesamt 121 Annäherungen), die nicht in den Trainingsdaten enthalten waren, trat eine wesentlich größere Fehlerhäufigkeit auf (siehe Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Vergleich der Fahrerhaltensanalysen mit untrainierten Daten

System	False-Positive	False-Negative	Fehler gesamt	Fehler-Anteil [%]
Fuzzy-Logic-Netz 1	18	5	23	19,01
Fuzzy-Logic-Netz 2	1	5	6	4,96
LVQ-Netz	2	7	9	7,44
Analytisch	4	2	6	4,96

Besonders das Fuzzy-Logic-Netz 1, das die trainierten Daten sehr gut abbildet, versagt bei den untrainierten Daten. Die insgesamt deutlich erhöhte Fehleranzahl ist aber auch darauf zurückzuführen, dass das von den Netzen stark gewichtete Beschleunigungssignal bei den untrainierten Daten einen wesentlich höheren Rauschanteil aufweist [BERNT 2005, S. 54].

Insgesamt bietet die Fahrerhaltensanalyse mit Neuronalen Netzen deutliches Potential, die False-Positive und False-Negative-Fehler zu reduzieren. Die Zusammenstellung der Trainings- und

Testdaten und das Training der Netze haben erheblichen Einfluss auf die Erkennungsleistung und Fehlerraten.

Für die weiterführenden Versuche zur Wirksamkeit (siehe 4.5) wurde die analytische Lösung benutzt, da hier der Anteil an False-Negative-Fehlern am geringsten ist.

4.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Da das Warndilemma bei der Stop-Schild-Assistenz sehr selten auftritt (siehe 4.2.2), konnte die Handlung des Systems auf eine Warnung beschränkt werden. Die konkrete Gestaltung der Warnung als zentralem Bestandteil der Mensch-Maschine-Schnittstelle des Stop-Schild-Assistenten ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig:

- **Häufigkeit der Situation:**
Tritt eine Situation und damit die entsprechende Warnung häufig auf, kann ein Lerneffekt zu kürzeren Reaktionszeiten auch bei weniger intensiven Warnungen führen.
- **Gefährlichkeit der Situation:**
Je gefährlicher die Situation, desto intensiver muss eine Warnung sein.
- **Einfluss auf Mitfahrer:**
Warnungen, die für Mitfahrer erkennbar sind (beispielsweise akustische Signale), senken die Akzeptanz des Systems beim Fahrer. Durch eine Warnung, gleich ob durch einen Fahrfehler ausgelöst oder False-Positive, wird bei den Mitfahrern potentiell immer die Fahrfertigkeit und Fahrtüchtigkeit des Fahrers in Frage gestellt.
- **Häufigkeit von False-Positive-Warnungen:**
Je häufiger False-Positive-Warnungen, umso weniger wird eine intensive Warnung akzeptiert.

Der Fahrfehler „Stop-Schild-Durchfahrt“ ist im alltäglichen Fahrbetrieb sehr selten, stellt aber, wenn er auftritt, eine sehr kritische Situation dar. Ein Lern- oder Gewöhnungseffekt an die Warnung des Stop-Schild-Assistenten kann deshalb nicht erwartet werden, der Fahrer muss die Warnung unmittelbar verstehen und richtig befolgen, um die Situation zu entschärfen. Dies fordert eine intensive Warnung, die vom Fahrer auch als unangenehm empfunden werden kann. Es ist möglich eine intensive Warnung zu implementieren, weil die Häufigkeit von False-Positive-Warnungen durch seltenes Auftreten des Warndilemmas und gute Erkennungsrate der Fahrerverhaltensanalyse minimiert werden kann. Da die Situation insgesamt selten auftritt, kann angenommen werden, dass auch eine Warnung, die von Mitfahrern bemerkt wird, akzeptiert wird.

Die Wirksamkeit einer Warnung ist stark von der Reaktionszeit und der richtigen Reaktion des Fahrers auf die Warnung abhängig. Als Reaktionszeit t_r wird hier die Zeit von Beginn der Warnung bis zum Erreichen des für die Verzögerung a_b notwendigen Bremsdrucks bezeichnet. Die Reaktionszeit kann auf unterschiedliche Art in einzelne Phasen unterteilt werden. Für die Anwendung Stop-Schild-Assistent ist eine Unterteilung in folgende Phasen nach LEE ET AL. [2004, S. 115] sinnvoll:

- **Mentale Bearbeitungszeit:**
Die Zeit, die benötigt wird, um die Warnung zu detektieren, zu identifizieren und eine Entscheidung zu treffen, wie gehandelt werden muss.
- **Bewegungszeit:**
Die benötigte Zeit, um den Fuß zum Bremspedal zu bewegen und das Bremspedal zu drücken.
- **Fahrzeugreaktionszeit:**
Die benötigte Zeit, die vom Drücken des Bremspedals bis zum Aufbau der erwünschten Verzögerung.

Die mentale Bearbeitungszeit kann durch die Intensität der Warnung und die Wahl des Sinneskanals beeinflusst werden. So werden auditive Reize fast immer schneller verarbeitet als optische [CHARWAT 1994, S. 365]. Das Alter der Person, die gewarnt wird, die Aufmerksamkeit und der Ermüdungszustand haben ebenfalls Einfluss auf die mentale Bearbeitungszeit, aber auch auf die Bewegungszeit.

Ab dem Zeitpunkt, an dem der Fahrer das Bremspedal bei einer Warnung berührt, ist eine zusätzliche Unterstützung möglich, um die restliche Reaktionszeit zu verkürzen. Es kann z.B. die Auslöseschwelle des Bremsassistenten verringert werden. Zusätzlich können gleichzeitig mit der Warnung die Bremsbacken angelegt werden, um über die Vorspannung im Bremssystem die Fahrzeugreaktionszeit zu minimieren. Da diese Unterstützung die Sicherheitsanforderung an das System deutlich erhöht, wurde bei der prototypischen Umsetzung darauf verzichtet.

Wie in 4.2.2 beschrieben wird als Reaktionszeit $t_r = 1\text{ s}$ angenommen. Um diese Reaktionszeit erreichen zu können, wird die Warnung intensiv und auf mehreren Sinneskanälen aktiviert:

- Als akustische Warnung wird durch eine Stimme, die ein deutliches „Stop“ spricht (Stop-Aufforderung), eine positive Handlungsaufforderung gegeben. Damit werden alle durch eine akustische Warnung erzielbaren Funktionen abgedeckt: Aufmerksamkeit erregen, die Gefahr klassifizieren und die notwendige Handlung spezifizieren [KÖNIG, MUTSCHLER 2003, S. 45].
- Im Head-Up-Display (HUD) wird ein großes Stop-Schild (siehe Bild 4-8) als optische Warnung direkt im primären Sichtfeld des Fahrers eingespielt.
- Alternativ zur Stop-Aufforderung wurde eine neutrale akustische Warnung durch einen Doppel-Piepton umgesetzt, der bei ACC-Systemen zur Übernahmeaufforderung benutzt wird.

Die hohe Priorität durch die intensive Warnung auf mehreren Sinneskanälen ist nach KÖNIG, MUTSCHLER [2003, S. 43] gerechtfertigt, weil eine Verkehrsgefährdung vorliegt und die Warnung zeitkritisch ist.



Bild 4-8: Stop-Schild-Assistent: Einblendung im Head-Up-Display bei Warnung

Um die mögliche Fehlreaktion bei einer fehlerhaften Auslösung des Stop-Schild-Assistenten auf freier Strecke zu minimieren, wurde zusätzlich zur Warnstufe eine Informationsstufe umgesetzt. Bei der Annäherung an ein Stop-Schild wird im Head-Up-Display eine Information über die Annäherung an eine Stop-Kreuzung, inklusive der Entfernung zur Haltelinie, eingeblendet (Bild 4-9).



Bild 4-9: Stop-Schild-Assistent: Voranzeige im HUD, Stop-Schild in 100 m Entfernung

Wird ein Stop-Schild fehlerhaft erkannt, kann der Fahrer durch die Voranzeige den Fehler rechtzeitig bemerken und sich auf die zu erwartende False-Positive-Warnung einstellen. Die Wirksamkeit der Voranzeige konnte in den Versuchen (siehe 4.5.1) bestätigt werden.

4.4 Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung

Nach der Definition der Applikation und der dafür notwendigen Situationsanalyse werden in der Top-Down-Entwicklung die Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung abgeleitet. Für die Stop-Schild-Assistenz sind drei Kriterien der Fahrumgebungserfassung besonders wichtig, die Sicherheit, die Qualität und die Reichweite der Erfassung.

4.4.1 Sicherheit der Erfassung

Fehler beim Erfassen des Stop-Schildes und dem Berechnen der Entfernung zur Haltelinie haben mögliche sicherheitskritische Auswirkungen. Dabei sind zwei mögliche Fehlerklassen zu unterscheiden, die analog zu den Fehlern der Fahrerhaltensanalyse (siehe 4.2.3) als False-Positive (fehlerhafte Systemauslösung, obwohl nicht nötig) und False-Negative (keine Systemauslösung, obwohl nötig) bezeichnet werden.

Eine False-Positive-Erfassung ist, je nachdem wo sie auftritt, als kritischer zu bewerten als eine False-Positive-Fahrerhaltensanalyse. Während bei letzterer die False-Positive-Warnung vor einem Stop-Schild auftritt, wo der Fahrer das Fahrzeug nach StVO ohnehin anhalten muss, kann bei einer Fehlerfassung die False-Positive-Warnung überall auftreten. Reagiert der Fahrer auf freier Strecke auf die Fehlwarnung mit einer Notbremsung, stellt dies für den nachfolgenden Verkehr eine erhebliche Gefährdung dar. False-Positive-Erfassungen müssen deshalb vermieden werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer mit einer Notbremsung auf eine False-Positive-Warnung auf freier Strecke reagiert, kann durch eine Informations-Voranzeige gesenkt werden (siehe 4.5.1). Bei häufiger Fehlerfassung und Fehlwarnung besteht auch die Gefahr des „Cry-Wolf-Effekts“ [KÖNIG, MUTSCHLER 2003, S. 12]. Der Fahrer reagiert auf eine gerechtfertigte Warnung nicht mehr, da aufgrund häufiger Fehlwarnungen die Assoziation zwischen Warnung und Angst verloren gegangen ist.

Eine False-Negative-Erfassung ist dann kritisch, wenn der Fahrer sich auf den Stop-Schild-Assistenten verlässt. Eine Möglichkeit für einen Missbrauch des Stop-Schild-Assistenten ist, dass der Fahrer die Warnung benutzt, um sich den letztmöglichen Bremspunkt vom Fahrzeug anzeigen zu lassen. Der Fahrer wartet in diesem Fall bewusst auf die Warnung und bremst erst dann. Bleibt die Warnung, beispielsweise durch eine False-Negative-Erfassung in diesem Fall aus, hat der Fahrer praktisch keine Möglichkeit mehr, das Fahrzeug vor der Haltelinie anzuhalten, da die Zeit bis zum Erkennen des Ausbleibens der Warnung sicher länger ist, als die angenommene Reaktionszeit bei der Berechnung des letzten Warnpunkts. Dies konnte in einzelnen Versuchen bestätigt werden (siehe 4.5.2).

Kann der beschriebene Missbrauch durch eine geeignete Gestaltung des Gesamtsystems verhindert werden, ist eine False-Negative-Erfassung weniger kritisch.

4.4.2 Qualität der Erfassung

Das wichtigste Qualitätsmerkmal der Fahrumgebungserfassung ist die Genauigkeit, mit der die Entfernung zur Haltelinie bestimmt werden kann. Prinzipiell muss die Genauigkeit umso höher sein, je geringer die Fahrzeuggeschwindigkeit bei der Annäherung an das Stop-Schild ist, da auch der Anhalteweg kleiner wird. Bei der Beurteilung der notwendigen Genauigkeit ist zu unterscheiden, ob die tatsächliche Entfernung größer oder kleiner als gemessen ist.

Ist die tatsächliche Entfernung größer als gemessen, besteht eine höhere Gefahr der fehlerhaften Analyse des Fahrerhaltens und damit einer False-Positive-Warnung. Eine Überprüfung der Erkennungsrate mit künstlich verschobenen Fahrdaten zeigt, dass die Fehlerrate mit zunehmender konstanter Verschiebung x_s in etwa linear ansteigt [BERNT 2005, S.55]. Bei einer Entfernungsabweichung von 5 m beträgt die Fehlerrate etwa 5 %. Die Fehlerrate in Prozentpunkten lässt sich durch

die Funktion $g(x_s) = x_s + 0,2$ annähern. Durch Training des Neuronalen Netzes mit künstlich verrauschten Positionsdaten konnte die Robustheit der Fahrerhaltensanalyse gegen fehlerhafte Entfernungsmessungen verbessert werden. Die Fehlerrate beträgt dann, bei 5 m konstanter Entfernungsabweichung, nur noch 2 %, die Funktion für die Annäherung ist $g(x_s) = 0,4 \cdot x_s + 0,2$.

Ist die Genauigkeit der Entfernungsbestimmung normalverteilt, wie beispielsweise bei der Bestimmung der Entfernung über GPS-Messung, ist die zu erwartende Rate von False-Positive-Auslösungen e_{FP} aufgrund zu kleiner gemessener Entfernung zur Haltelinie:

$$e_{FP} = \int_0^{+\infty} g(x_s) \cdot f_{err}(x_s) dx_s = \int_0^{+\infty} \frac{0,4 \cdot x_s + 0,2}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_s - \mu}{\sigma}\right)^2} dx_s$$

Dabei ist $f_{err}(x_s)$ die Gauß'sche Normalverteilung, σ die Standardabweichung, μ der Erwartungswert und $g(x_s)$ die Rate der False-Positive-Warnungen aufgrund fehlerhafter Fahrerhaltensanalyse bei konstantem Fehler der Entfernung zur Haltelinie x_s .

Bild 4-10 zeigt eine Abschätzung der zu erwartenden Rate der False-Positive-Warnungen über der Standardabweichung der Entfernungsmessung mit normal trainiertem und mit verrauschten Daten trainiertem Neuronalen Netz zur Fahrerhaltensanalyse. Da die Rate der False-Positive-Warnungen bei konstanter Abweichung mit den Versuchsdaten aus 4.2.4.2 berechnet wurde, die Versuchsdaten aber nicht unbedingt repräsentativ für alle Stop-Schild-Annäherungen sind, ist die Genauigkeit der Abschätzung begrenzt.

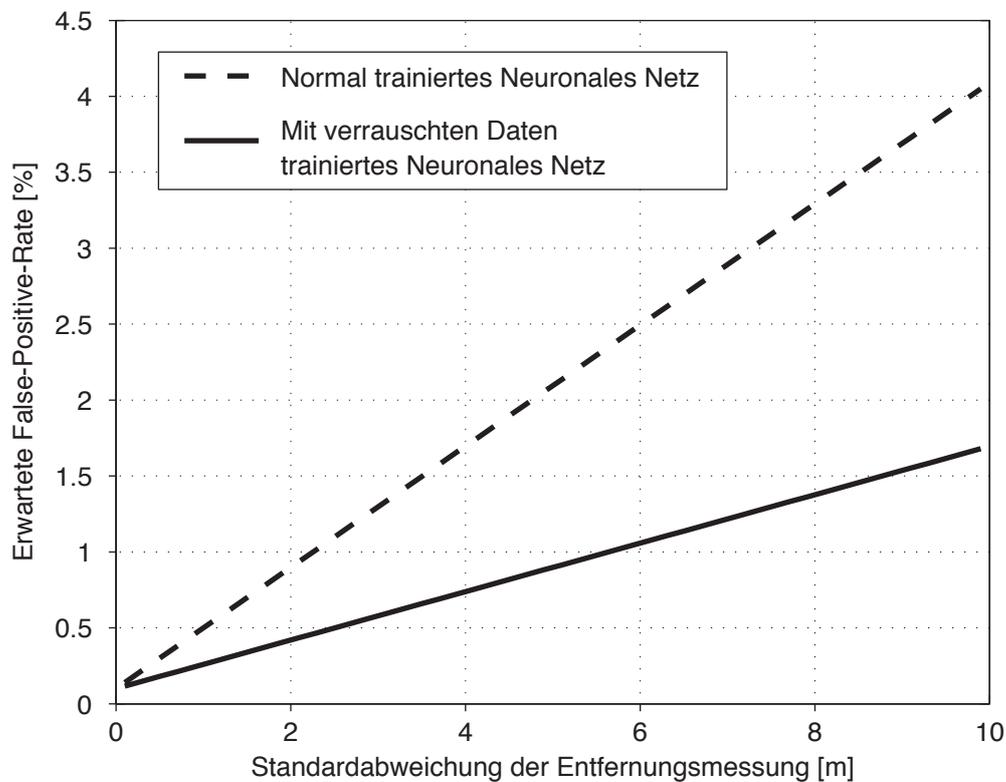


Bild 4-10: Zu erwartende False-Positive-Rate über der Standardabweichung der Entfernungsmessung zur Haltelinie

Wird eine False-Positive-Rate von einem Prozent akzeptiert, sollte die Standardabweichung der Entfernungsmessung bei einem normal trainierten Neuronales Netz nicht größer als 2 m sein. Bei dem robusteren, mit verrauschten Daten trainierten Netz, ist bei gleicher False-Positive-Rate eine Standardabweichung um 8 m möglich.

Wird die Entfernung zur Haltelinie zu groß gemessen, sinkt die Wahrscheinlichkeit für False-Positive-Auslösungen. Im Fall einer Warnung liegt der Warnpunkt zu nah an der Haltelinie, der zur Verfügung stehende Anhalteweg ist um den Messfehler x_s verkürzt. Für den Fall, dass der berechnete Anhalteweg genau mit dem tatsächlichen übereinstimmt, kommt das Fahrzeug um den Messfehler x_s hinter der Haltelinie zum Stehen. Bild 4-11 zeigt, dass nach dieser Rechnung auch bei geringen Standardabweichungen ein nicht vernachlässigbarer Anteil die Haltelinie so weit überfährt, dass ein Unfall wahrscheinlich ist.

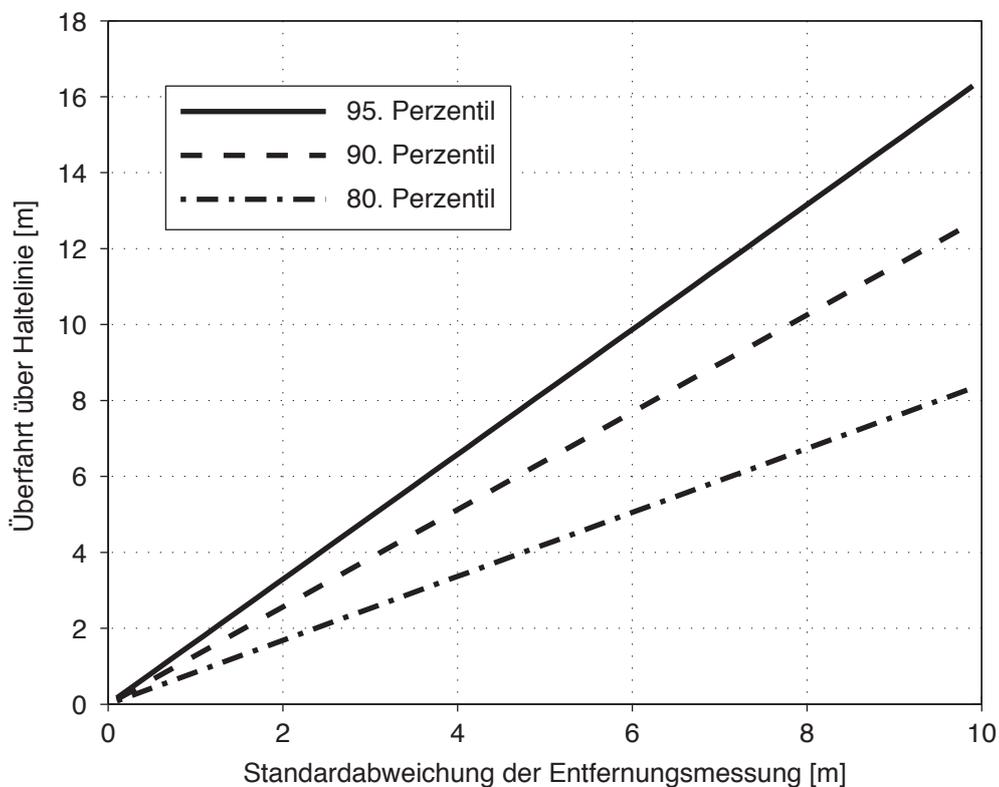


Bild 4-11: Perzentile der Überfahrtdistanzen über der Standardabweichung der Entfernungsmessung

Für eine genaue Bewertung, wie weit eine Haltelinie maximal überfahren werden kann, ohne einen Unfall auszulösen, sind noch weitere Untersuchungen nötig. Es besteht ferner die Möglichkeit, dass eine Veränderung des Warnpunkts positiven oder negativen Einfluss auf das Reaktionsverhalten der Fahrer hat, was bei einer exakten Festlegung der Genauigkeitsanforderungen berücksichtigt werden muss.

Zusammen betrachtet, ist ein Messfehler der Entfernung dann als kritischer zu bewerten, wenn die Entfernung zu groß gemessen wird, also im Fall eines Fahrerfehlers die Gefahr besteht, dass der Fahrer das Fahrzeug nicht mehr vor der Haltelinie anhalten kann. Es ist daher sinnvoll, die Entfer-

nungsmessung mit einer negativen Verschiebung als Sicherheitsreserve zu beaufschlagen, solange die Anzahl der False-Positive-Auslösungen dadurch nicht übermäßig ansteigt.

4.4.3 Reichweite der Erfassung

Ein Mindestmaß für die Reichweite der Erfassung des Stop-Schildes ist die Entfernung des Warnpunkts, also der Anhalteweg. Wird bei Kreuzungen außerhalb geschlossener Ortschaften eine maximale Geschwindigkeit von 110 km/h angenommen, berechnet sich der Anhalteweg nach den Annahmen aus 4.2.2 (1 s Reaktionszeit und eine Bremsung mit $a_b = 6 \text{ m/s}^2$) zu $s_a = 108,3 \text{ m}$. Soll zusätzlich noch eine Informationsstufe realisiert werden (vgl. 4.3), ist eine entsprechend größere Reichweite der Erkennung notwendig. Wird eine Reaktionszeit von 1 s und eine Komfortbremsung mit einer Verzögerung von $a_{bk} = 3 \text{ m/s}^2$ angenommen, ist eine Reichweite von mindestens 186,2 m erforderlich.

Bei Kreuzungen innerhalb geschlossener Ortschaften mit einer maximalen Geschwindigkeit von 70 km/h ist eine Mindestreichweite von 51,0 m nur für die Warnung und von 82,5 m für die zusätzliche Informationsstufe notwendig. Die benötigten Reichweiten sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Benötigte Erfassungreichweiten für die Stop-Schild-Assistenz

Situation	Geschwindigkeit km/h	Erfassungreichweite	
		ohne Informationsstufe m	mit Informationsstufe m
Innerorts	70	108,3	186,2
Außerorts	110	51,0	82,5

4.4.4 Mögliche Erfassungsmethoden

Mögliche Methoden der Stop-Schild-Erfassung lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- Erfassen der Stop-Schilder mit bordautonomer Sensorik, bevorzugt mittels einer Videokamera
- Erfassen der Stop-Schilder mit Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation, z.B. durch Sender an den Stop-Schildern
- Erfassen der Fahrzeugposition, z.B. über GPS-Vermessung und Benutzung einer erweiterten digitalen Karte, die die Stop-Schild-Positionen enthält

Stop-Schilder können aufgrund ihrer exklusiven Form sehr gut mit Videosensorik erfasst werden. Die Videoerfassung alleine kann den Anforderungen an die Umgebungserfassung dennoch nicht genügen. Die Reichweite ist durch die Auflösung der Kamera und mögliche Verdeckungen oder

Teilverdeckungen der Stop-Schilder begrenzt. Die in 4.4.3 geforderten Reichweiten sind nur mit aufwendigen Kamerasystemen unter guten Bedingungen zu erzielen.

Die geforderte Sicherheit kann bei einer reinen Videoerfassung nicht gewährleistet werden. Bei spitzen Zufahrten, Autobahnbaustellen (siehe Bild 4-12) oder sogar bei Werbeplakaten ist eine False-Positive-Erkennung möglich.



Bild 4-12: Autobahnbaustelle: Mögliche False-Positive-Erfassung eines Stop-Schildes bei Videoerfassung

Die Videoerfassung ist deshalb nur in Kombination mit einer digitalen Karte möglich, aus der zumindest der Typ der aktuellen Straße bekannt ist. Die Video-Erfassung des Stop-Schildes kann anhand der digitalen Kartendaten plausibilisiert werden. Die Erfassungsgenauigkeit ist bei Videoerfassung, vor allem bei der Benutzung von mehreren Kameras und einer Stereo-Anordnung, im Allgemeinen ausreichend. Größere Abweichungen können auftreten, wenn das Stop-Schild wie in Bild 4-13 einige Meter vor der Haltelinie platziert ist.



Bild 4-13: Stop-Schild vor der Haltelinie: Mögliche fehlerhafte Entfernungsmessung bei Videoerfassung

Die Erfassung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (z.B. in SCHUTZRECHT WO 95/06304 A1) setzt ebenfalls Wissen über die aktuelle Fahrzeugposition, z.B. über eine digitale Karte, voraus. Die Signalausbreitung möglicher Kommunikationsmethoden wie Funk, RFID oder W-LAN ist im Allgemeinen nicht richtungsspezifisch, das heißt der Empfang des Signals ist auch bei Annäherung aus der Vorfahrtsrichtung möglich. Um eine False-Positive-Erkennung zu vermeiden, muss das System die Straße, für die das Stop-Schild gültig ist, mit der aktuellen Straße vergleichen. Für Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation sind erhebliche Investitionen auf Infrastrukturseite notwendig, um die benötigten Informationen zur Verfügung zu stellen. Die Reichweite von Kommunikationssystemen ist höher einzuschätzen als die von bordautonomen Sensorsystemen, die Positionsbestimmung mit Hilfe von Kommunikationssystemen wie W-LAN erreicht bisher aber nur Genauigkeiten ab 20 m [MATTERN 2005, S. 32].

Werden die Stop-Schilder in erweiterte digitale Karten eingezeichnet und die Entfernung zum Stop-Schild aus der Stop-Schild-Position, der Fahrzeugposition und dem Straßenverlauf berechnet, kann das Stop-Schild aus praktisch beliebiger Entfernung erfasst werden. Problematisch ist die Genauigkeit der Positionserfassung des Fahrzeugs, die besser als 2 m sein sollte (siehe . Die Genauigkeit von Standard-GPS (13 bis 22 m, siehe DEPARTMENT OF DEFENCE [2001, S.3-6]) ist hier nicht ausreichend. Durch das geplante Galileo-System der Europäischen Union sind höhere Genauigkeiten in Aussicht. Durch die Koppelung der Satelliten-Positionsvermessung mit Fahrzeugdaten, der so genannten Koppelnavigation, kann die Genauigkeit erhöht werden [KLANNER, 2004, S. 79]. Alternativ kann auch Differential-GPS eingesetzt werden. So bietet das WAAS/EGNOS-System, dessen Korrektursignal über Satellit ausgestrahlt wird eine Genauigkeit von 2 bis 3 m [DEPARTMENT OF DEFENCE 2001, S.3-17].

Ein weiteres Problem beim Auslesen der Stop-Schild-Positionen aus Karten ist deren Aktualität und die höheren Anforderungen an ihre Korrektheit bei einem Einsatz in einem Sicherheitssystem. Durch fehlerhafte Karten sind sowohl False-Positive- als auch False-Negative-Erkennungen möglich. Der Aufwand für die Aktualisierung kann reduziert werden, wenn die Kartendaten nicht,

wie bisher bei Navigationssystemen üblich, in Fahrzeug mitgeführt werden, sondern von einem zentralen Server per Datenverbindung abgerufen werden. Es ist dann nur noch die Aktualität des zentralen Servers sicher zu stellen. Bei Navigationsgeräten mit begrenzter Speicherkapazität sind derartige Lösungen bereits verfügbar [T-MOBILE 2004, S. 4]. Durch die höheren Bandbreiten und geringeren Kosten, die durch die Verbreitung von Mobilfunksystemen der 3. Generation zu erwarten sind, wird die zentrale Speicherung der Daten zunehmend an Attraktivität gewinnen.

Die höheren Anforderungen an die Korrektheit der Daten betreffen nicht nur Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen, sondern auch andere Fahrerassistenzsysteme, die digitale Karten zur Fahrumgebungserfassung benutzen. Ein Überblick sowie Ansätze zur Standardisierung und Validierung von digitalen Karten finden sich bei BLERVAQUE ET AL. [2006 S. 2FF].

4.5 Systemumsetzung und Test

Machbarkeitstests des Stop-Schild-Assistenten müssen zwei grundlegende Fragen beantworten:

- Ist eine zu häufige False-Positive-Warnung vermeidbar?
- Ist die Warnung wirksam, d.h. kann das Fahrzeug nach der Warnung noch vor der Halte-
linie angehalten werden?

Offline-Tests an den aufgezeichneten Versuchsdaten zeigen, dass False-Positive-Warnungen sehr gut minimiert werden können. Um die Wirksamkeit beurteilen zu können, sind Online-Tests notwendig, die die Fahrerreaktion mit einschließen. Dafür wurde das Prototyp-System im dynamischen Fahrsimulator der BMW Group Forschung und Technik und in einem Versuchsfahrzeug integriert.

4.5.1 Umsetzung und Test im Simulator

Die Tests im dynamischen Fahrsimulator der BMW Group Forschung und Technik wurden durchgeführt, um die Wirksamkeit des Systems zu prüfen. Die Probanden starteten den Versuch, ohne zu wissen, dass ein Stop-Schild-Assistenzsystem im Simulatorfahrzeug integriert ist. So können Aussagen über die Reaktion von völlig unvorbereiteten Fahrern auf eine Warnung getroffen werden.

Für die Implementierung des Stop-Schild-Assistenten in die Fahrsimulationsumgebung wurde die Applikation in ein Modell eingefügt, das über definierte Schnittstellen die benötigten Werte aus der Fahrsimulator-Software zur Verfügung stellt und Aktionen zurückgibt. Es ist möglich, das Modell in Co-Simulation zu betreiben. Dabei läuft das Modell in der Simulink-Umgebung und kommuniziert, am selben Rechner oder über Netzwerk, mit der Simulatorsoftware. Alternativ kann mit dem RealTime-Workshop automatisiert C-Code aus dem Modell erzeugt werden. Dieser wird kompiliert und als Plug-In in die Fahrsimulatorsoftware eingebunden.

Die Einblendungen im Head-Up-Display wurden durch entsprechend platzierte Einblendungen in der Fahrumgebungsprojektion ersetzt (Virtuelles Head-Up-Display, siehe Bild 4-14). Als akustische Warnung wurde die Stop-Aufforderung mit Stimme umgesetzt (vgl. 4.3).

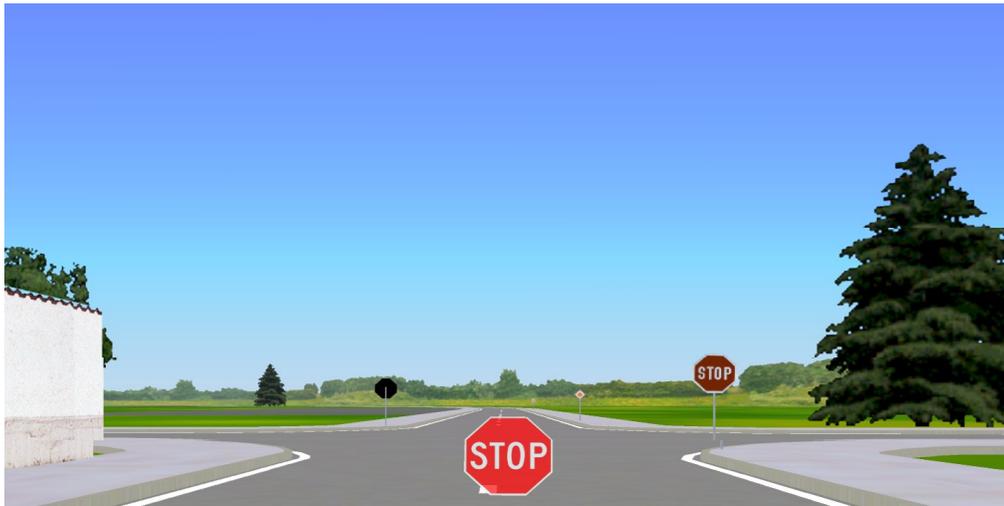


Bild 4-14: Simulatorumsetzung: Virtuelles Head-Up-Display

In einem Simulator-Versuch mit 19 Probanden wurden folgende Fragestellungen untersucht [Noszko 2005, S.4]:

- Wie schnell reagieren die Fahrer auf eine Warnung? Kommen sie rechtzeitig vor der Halteinie zum Stehen?
- Wie reagieren die Fahrer auf False-Positive-Auslösungen? Vertrauen sie dem Assistenten blind oder orientieren sie sich, bevor sie bremsen?
- Welchen Nutzen hat die Informationsstufe, besonders bei der Reaktion der Fahrer auf False-Positive-Auslösungen?
- Wie beurteilen die Fahrer den Stop-Schild-Assistenten und das zweistufige Anzeigekonzept?

Im Versuch befuhren die Probanden einen Rundkurs mit 5 Kreuzungen und einem Kreisverkehr. An drei der Kreuzungen hatten die Probanden aufgrund eines Stop-Schildes anzuhalten und Vorfahrt zu gewähren.

Nach einer Einführungsfahrt, bei der sich die Probanden an den Simulator gewöhnen konnten, wurden zwei Versuchsfahrten durchgeführt. In der ersten Fahrt wurde die Wirksamkeit des Stop-Schild-Assistenten geprüft. Dazu wurden die Stop-Schilder in der Fahrsimulationsumgebung ausgeblendet und im Moment einer Warnung wieder eingeblendet. Die Informationsstufe (vgl. 4.3) des Stop-Schild-Assistenten war deaktiviert. Zusätzlich mussten die Fahrer eine anspruchsvolle Nebenaufgabe erfüllen: Sie wurden gebeten, in einem Atlas am Beifahrersitz bestimmte Seiten aufzuschlagen und die Lage von Ortschaften zu vergleichen. Durch das Ausblenden der Stop-Schilder und die Ablenkung durch die Nebenaufgabe war es möglich, den Fehler Stop-Schild-Durchfahrt sehr zuverlässig zu provozieren. Die Fahrer wurden zu Beginn der Fahrt nur informiert, dass ein „sicherheitsrelevantes Fahrerassistenzsystem“ im Fahrzeug verbaut ist. Damit wurde vermieden, dass die Probanden eine Erwartungshaltung haben, die Auswirkungen auf die Reaktionszeit hat. Zusätzlich zu den provozierten Auslösungen (True-Alarms) wurden die Probanden mit False-Positive-Auslösungen (False-Alarms) konfrontiert, die vom Versuchsleiter manuell eingestreut werden

konnten. Bis auf eine Ausnahme erhielten aber alle Probanden zuerst einen oder mehrere True-Alarms.

Neben den fahrdynamischen Parametern, die für die Funktion des Stop-Schild-Assistenten notwendig sind (vgl. 4.2.3), und der Entfernung zum Stop-Schild, wurde aufgezeichnet, ob der Fahrer eine Nebenaufgabe zu erfüllen hatte. Weiter wurde das Blickverhalten des Probanden mit einer Videokamera erfasst, wobei nur zwischen den Kategorien „Blick auf die Straße“ und „Blick nicht auf die Straße“ unterschieden wurde.

Die Datenauswertung wurde auf folgende Auslösungen beschränkt:

- True Alarm 1:
Erster True-Alarm: Die Probanden wussten zu diesem Zeitpunkt nicht, worum es in der Untersuchung geht. Dies dient der Überprüfung, ob die Warnung ohne Vorwissen verstanden und richtig befolgt wird.
- True Alarm 2:
Zweiter True-Alarm: Hiermit sollte überprüft werden, ob sich die Bremsreaktion verändert, wenn die Probanden wissen oder zu wissen glauben, was von ihnen erwartet wird.
- False Alarm 1:
Erster False-Alarm: Dieser dient der Überprüfung, ob die Fahrer blind auf den Assistenten vertrauen oder nicht.
- True Alarm 3:
Erster True Alarm nach False Alarm 1: Es handelt sich dabei nicht unbedingt um den dritten True Alarm im chronologischen Sinne.
- False Alarm 2:
Zweiter False-Alarm: Hiermit soll geprüft werden, ob die Probanden ggf. aus False Alarm 1 gelernt haben, dass sie dem Assistenten nicht zu 100% vertrauen können.

In der zweiten Versuchsfahrt wurden die Probanden gebeten, den Stop-Schild-Assistenten frei zu erkunden. Dazu wurde auch die Informationsstufe des Assistenten, beginnend bei einer Entfernung zum Stop-Schild von 150 m, aktiviert. Auch in der zweiten Versuchsfahrt wurden vom Versuchsleiter False-Positive-Auslösungen eingestreut, um die Auswirkung der Informationsstufe zu überprüfen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Wirksamkeit des Stop-Schild-Assistenten gegeben ist, aber noch Verbesserungen möglich sind. Die Tabelle 4-4 zeigt, dass ein großer Anteil der Versuchspersonen schon beim ersten True-Alarm angehalten hat. Es ist aber auch ersichtlich, dass beim ersten False-Alarm ebenfalls 40% der Probanden anhielten, was in Realität eine Verkehrsgefährdung darstellen könnte. Der hohe Anteil von 40% muss aber auch im Zusammenhang mit den kurze Zeit vorher ausgelösten True-Alarms gesehen werden. Die Probanden waren möglicherweise darauf eingestellt, dass nach der Warnung eine möglichst schnelle Bremsung von ihnen erwartet wird [NOSZKO 2005, S.25]. Dies ist auch anhand von Bild 4-15 ersichtlich. Das Diagramm zeigt die Mittelwerte der Zeitspanne zwischen Blickausrichtung auf die Straße nach der Warnung und dem Beginn der Bremsung. Zwar richten praktisch alle Probanden den Blick zuerst auf die Straße, die Zeitspanne bis zum Beginn der Bremsung bleibt aber bei False-Alarm 1 unterhalb der postulierten Schwelle von 0,25 s, die für das Interpretieren einfacher Wahrnehmungsinhalte, wie

4. Die Stop-Schild-Assistenz

die Abwesenheit eines Stop-Schildes, nötig ist [Noszko 2005, S.23]. Die Schwelle ist in Bild 4-15 durch eine gestrichelte Linie eingezeichnet.

Tabelle 4-4: Anzahl der Probanden, die nach True- und False-Alarm angehalten haben (Informationsstufe deaktiviert)

Alarm	N	Angehalten		Nicht angehalten	
		absolut	relativ [%]	absolut	relativ [%]
True 1	19	18	94,74	1	5,26
True 2	18	16	88,89	2	11,11
False 1	20	8	40,00	12	60,00
True 3	19	17	89,47	2	10,53
False 2	20	1	5,00	19	95,00

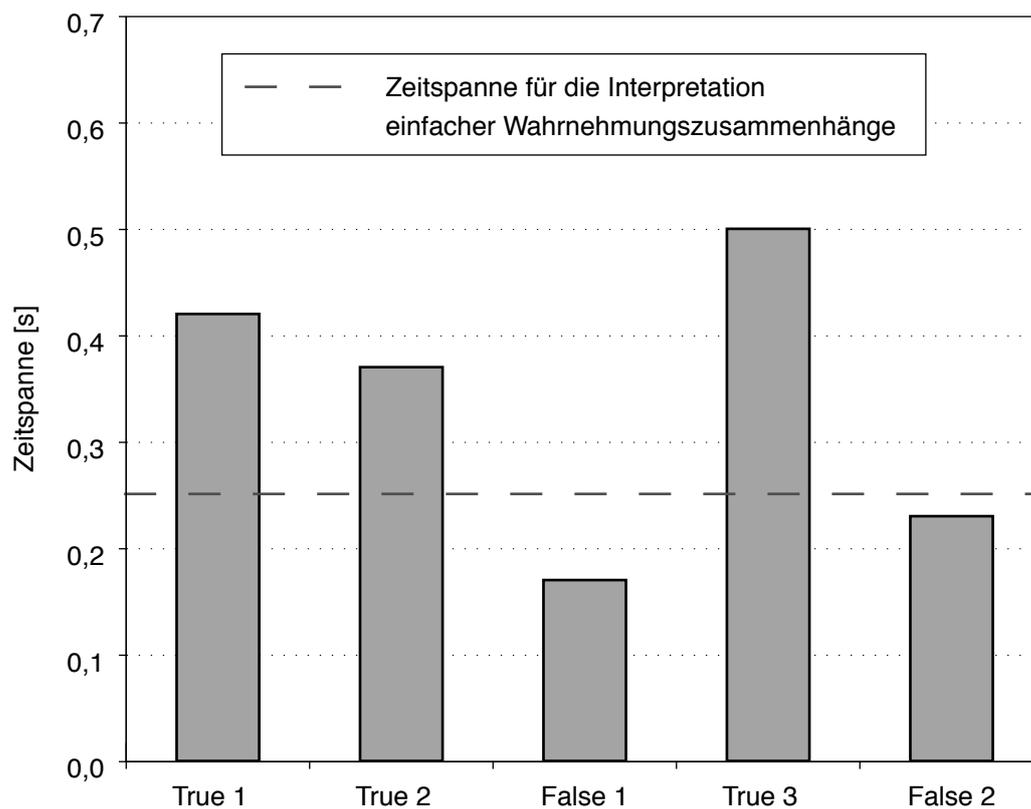


Bild 4-15: Zeitspanne zwischen Blickausrichtung auf die Straße und Betätigung des Bremspedals (Mittelwerte)

Obwohl bei False-Alarm 1 die Orientierung also gleichzeitig mit Beginn der Bremsung oder erst danach erfolgte, zeigt Tabelle 4-5, dass die mittlere Verzögerung auch bei den Probanden, die anhielten, geringer ist, als beispielsweise beim ersten True-Alarm. Die Beschleunigungen wurden in

dem Zeitraum von der Berührung des Bremspedals bis zum Fahrzeugstillstand (True-Alarm) bzw. Lösen des Bremspedals (False-Alarm) gemessen. Die False-Alarms, bei denen die Probanden das Bremspedal nicht berührten, wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 4-5: Mittelwerte der Bremsverzögerungen bei True- und False-Alarms

Alarm	N	MW m/s ²	Min m/s ²	Max m/s ²	SD m/s ²
True 1	18	-5,95	-2,82	-7,41	1,45
True 2	16	-6,13	-4,33	-7,31	0,95
False 1 (angehalten)	8	-4,99	-1,59	-7,32	2,08
False 1 (nicht ang.)	11	-2,06	-0,51	-5,26	1,91
True 3	17	-5,01	-2,42	-7,09	1,57
False 2 (angehalten)	1	-2,96	-	-	-
False 2 (nicht ang.)	15	-1,07	-0,44	-2,79	0,74

Beim zweiten False-Alarm traten wesentlich geringere Verzögerungen auf (Tabelle 4-5), nur noch ein Proband bremste bis in den Stillstand ab (Tabelle 4-4). Die Probanden, die nach den False-Alarms nicht anhielten, verzögerten nur geringfügig. Dies lässt den Schluss zu, dass die Probanden, sobald ihnen bewusst war, dass auch False-Alarms möglich sind, wenig Probleme hatten, diese von True-Alarms zu unterscheiden.

Tabelle 4-6: Distanzen zur Haltelinie bei Fahrzeugstillstand

Alarm	N	MW m	Max m	Min m	SD m
True 1	18	1,30	26,40	-7,26	7,44
True 2	16	-1,29	3,56	-5,05	2,55
True 3	17	-0,46	20,04	-7,91	6,12

Ein wichtiges Kriterium für die Wirksamkeit des Stop-Schild-Assistenten ist die Stillstandsposition nach einem True-Alarm. Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 zeigen, dass beim ersten True-Alarm nur 44% der Probanden vor dem Stop-Schild anhalten konnten und dieses im Mittel um 1,3 m überfahren. Der Grund für das häufige Überfahren des Stop-Schildes ist sowohl in der geringen mittleren Verzögerung von 5,95 m/s² beim ersten True-Alarm (siehe Tabelle 4-5), als auch in der Reaktionszeit von 1,06 s beim ersten True-Alarm und Blick in den Atlas zu suchen (Bild 4-16). Die Werte für Reaktionszeit beim Blick in den Atlas und durchschnittlicher Verzögerung sind geringfügig schlechter als die beim Berechnen des Warnpunkts angenommenen. Beim Blick auf die Straße sind die Reaktionszeiten aber kürzer als angenommen. Die mittlere Verzögerung reicht weder beim ersten, noch bei späteren True-Alarms an die auf trockener Straße erzielbaren Werte heran. Hier ist durch

Einsatz eines Bremsassistenten eine Verbesserung möglich. Dabei können die Auslöseschwellen des Bremsassistenten bei einer Stop-Schild-Warnung abgesenkt werden, um eine möglichst hohe Wirksamkeit zu erreichen. Die nicht optimalen Verzögerungen in den Versuchen können aber auch durch das ungewöhnliche Verhalten des Simulators bei den Bremsungen erklärt werden. Bei hohen Verzögerungen verschlechtert sich die Beschleunigungssimulation durch Kippen des Simulators, was von einigen Probanden als unangenehm empfunden wurde.

Tabelle 4-7: Anzahl der Probanden, die vor und nach der Haltelinie zum Stillstand kamen

Alarm	N	Vor dem Schild angehalten		Nach dem Schild angehalten	
		absolut	relativ [%]	absolut	relativ [%]
True 1	18	8	44,44	10	55,55
True 2	16	11	68,75	5	31,25
True 3	17	11	64,71	6	35,29

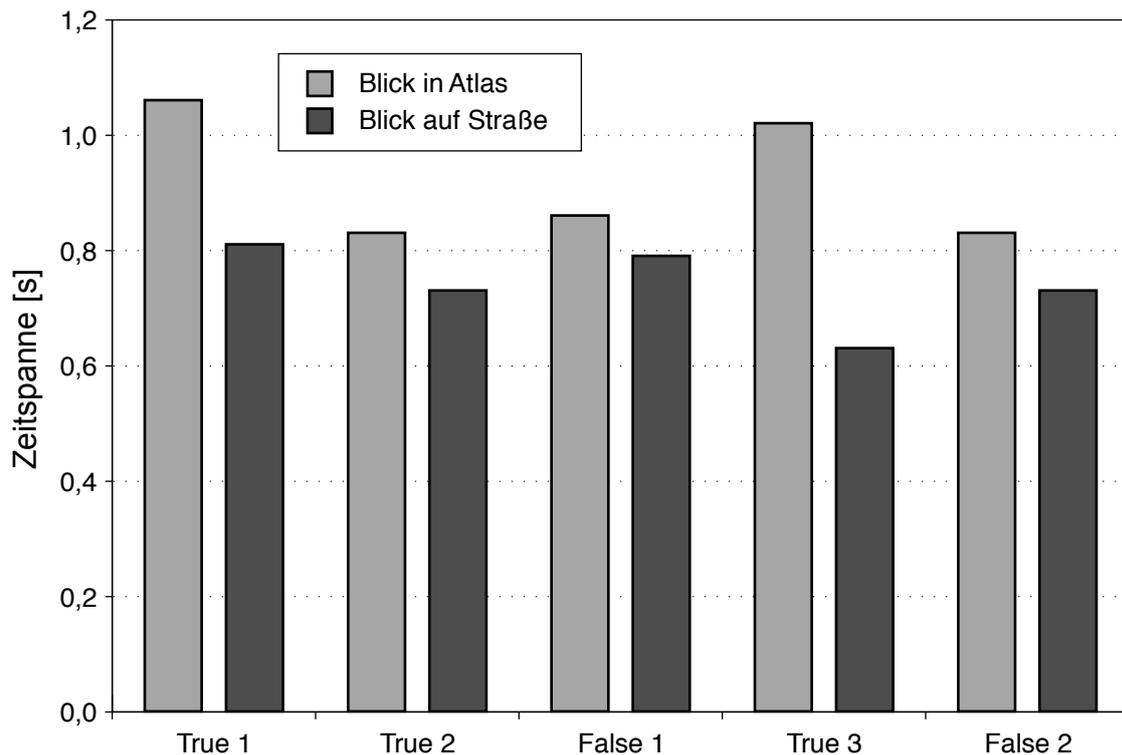


Bild 4-16: Zeitspanne von Beginn der Warnung bis Beginn der Bremsung bei Blick auf die Straße und Blick in den Atlas

Bei der zweiten Versuchsfahrt mit eingeschalteter Informationsstufe wurden die Probanden nicht mehr durch eine Nebenaufgabe abgelenkt. Die Informationsstufe hatte einen deutlichen Einfluss auf die Reaktion der Probanden beim ersten vom Versuchsleiter eingestreuten False-Alarm. Die

meisten Probanden nahmen nur noch den Fuß vom Gas oder tippten das Bremspedal kurz an [Noszko 2005, S. 27]. Nur vier der 19 Probanden erreichten dabei Verzögerungen größer als 3 m/s^2 .

Bei der subjektiven Beurteilung durch eine Befragung nach der zweiten Versuchsfahrt bewerteten 18 der 19 Versuchspersonen den Stop-Schild-Assistent als nützliche und sinnvolle Assistenzfunktion. Das zweistufige MMI-Konzept wurde von etwa 65% der Probanden mit „sehr gut“, von 35% mit „gut“ bewertet.

Zusammenfassend zeigt der Versuch, dass die Wirksamkeit des Stop-Schild-Assistenten gegeben ist. Ein Unterstützen der Fahrer bei der Bremsung kann noch zu besseren Werten führen. Bei False-Positive-Auslösungen sind abrupte Bremsmanöver nicht auszuschließen, deshalb muss die Erfassungssicherheit entsprechend hoch sein (vgl. 4.4.1). Da die Probanden sich in den meisten Fällen aber vor einer Bremsung orientieren, ist die Sicherheit einer Warnung wesentlich höher einzuschätzen, als die einer autonomen Bremsung.

4.5.2 Umsetzung und Test im Fahrzeug

Mit Versuchen im Realfahrzeug wurden Optimierungen und Subjektiv-Tests zu folgenden Themen durchgeführt:

- Warndilemma:
Ist die Grenze der False-Positive-Auslösung bei sportlicher Annäherung erkennbar?
- Absichtliches Durchfahren:
Reagiert das System optimal bei absichtlichem langsamen Überfahren der Haltelinie?
- False-Negative-Auslösung:
Bei einzelnen Tests wurde untersucht, ob Fahrer, die eine Auslösung des Systems erwarten, vor der Haltelinie anhalten können, wenn die Warnung ausbleibt.

Für die Umsetzung im Fahrzeug wurde ein Versuchsträger-Fahrzeug der BMW Group Forschung und Technik auf Basis des BMW 530i mit folgender Ausstattung benutzt:

- Eine dSpace Autobox Real-Time-Plattform. Der Stop-Schild-Assistent wurde für die Hardware der Plattform kompiliert. Über einen Industrie-PC oder einen Laptop und ein im Fahrzeug verbautes Display steht mittels der dSpace-Software ControlDesk eine grafische Oberfläche für die Benutzerkommunikation zur Verfügung.
- Das Serien-Head-Up-Display wurde mit einer VGA-Schnittstelle ausgerüstet, um beliebige Grafiken anzeigen zu können.
- Ein hochgenauer GPS-Empfänger, mit dem der Empfang von Differential-GPS im Real-Time-Kinematic-Modus [NOVATEL, 2006] möglich ist. Dieser erlaubt Positionsgenauigkeiten bis unter 2 cm bei Update-Frequenzen bis 100 Hz.

Der Stop-Schild-Assistent wurde auf die Autobox appliziert. Die benötigten Fahrdynamikdaten werden von dSpace-S-Function-Blöcken bereit gestellt. Die Ergebnisse von Simulink-Blöcken können in ControlDesk direkt benutzt werden, um optische und akustische Signale auszulösen.

Die GPS-Position wird über die serielle Schnittstelle an die Autobox übertragen und von einer S-Function im Simulink-Modell zur Verfügung gestellt. Die Entfernung zum Stop-Schild wird als einfache Streckenentfernung zwischen der Position des Haltepunkts am Stop-Schild und der aktuellen Position des Fahrzeugs berechnet. Kurven oder Seitenabweichungen werden bei der Annäherung an das Stop-Schild nicht berücksichtigt, für Funktionstests auf Teststrecken ist dies aber nicht nachteilig.

Die Tests zeigen, dass die Grenzen des Stop-Schild-Assistenten für die Fahrer gut erkennbar sind. False-Positive-Auslösungen entstehen bei höheren Annäherungsgeschwindigkeiten, wie sie bei Außerortskreuzungen auftreten, nur bei sehr sportlicher Fahrweise.

Bei Versuchen zur absichtlichen Durchfahrt mit langsamer Geschwindigkeit wurde die untere Geschwindigkeitsschwelle, bei der das System aktiviert wird, auf 15 km/h optimiert. Das Erkennen der in 4.2.3 beschriebenen Sondersituation, bei der eine False-Positive-Auslösung bei mehreren Vorderfahrzeugen unterdrückt werden muss, wurde ebenfalls im Fahrzeug abgestimmt.

Tests bei denen der Stop-Schild-Assistent deaktiviert wurde, die Fahrer aber die Warnung erwarteten, zeigen, dass es für den Fahrer kaum möglich ist, die False-Negative-Situation so rechtzeitig zu erkennen, dass er noch vor der Haltelinie anhalten kann (vgl. 4.4.1.). Es ist deshalb erforderlich, die beschriebene Missbrauchsmöglichkeit zu verhindern.

5 Linksabbiegeassistentz

Im Rahmen des Forschungsprojekts PReVENT wurde der Prototyp einer Linksabbiegeassistentz entwickelt. PReVENT ist ein integriertes Projekt des sechsten Europäischen Rahmenprogramms in dem 52 Automobilhersteller, Zulieferer und Forschungseinrichtungen Aktive Sicherheitssysteme und Technologien entwickeln [PReVENT 2008].

Die Linksabbiegeassistentz verhindert die Kollision von links abbiegenden mit entgegenkommenden Fahrzeugen indem bei Erkennen der Abbiegeabsicht und hoher Kollisionswahrscheinlichkeit eine autonome Bremsung eingeleitet wird.

5.1 Unfalltyp und Systemdefinition

5.1.1 Unfalltyp

Die Bundesunfallstatistik (siehe 3.2.3.1), die Unfallanalysen der GIDAS-Datenbank (siehe 3.2.3.2) und die Einzelunfallanalyse der BMW-Unfalldatenbank (siehe 3.2.4) zeigen, dass bei etwa 20 bis 30% der Unfälle an Kreuzungen ein Assistenzsystem wirksam sein kann, das Zusammenstöße zwischen einem links abbiegendem und einem entgegenkommenden Fahrzeug verhindert. Im Karlsruher Unfalltypenkatalog [REICHART 2001, S. 167] sind diese Unfälle mit den Typen 211 bis 213 codiert. Aus der GIDAS-Datenbank und der Einzelunfallanalyse ist zusätzlich ersichtlich, dass es sich bei diesen Unfällen zum größten Teil nicht um Rotlichtmissachtungen handelt. Diese werden einem anderen Assistenzsystem zugeordnet. Ein Aktives Sicherheitssystem für Linksabbiegeunfälle muss Unfälle an Kreuzungen verhindern, an denen es keine getrennte Lichtsignalregelung für die links abbiegenden Fahrzeuge gibt. Um einen Fehler des links abbiegenden Fahrers zu erkennen, muss dessen Fahrerverhalten analysiert werden. Darüber hinaus muss nicht nur wie beim Stop-Schild-Assistent, die unveränderliche örtliche Verkehrsregelung, sondern es müssen andere Verkehrsteilnehmer erkannt und die aktuelle Verkehrssituation interpretiert werden. Der genaue Fehler des verursachenden Fahrers, beim Beurteilen der zeitlich-räumlichen Konstellation, dem Entdecken oder der Erwartungsbildung, spielt aus der Sicht eines Aktiven Sicherheitssystems keine Rolle.

5.1.2 Untertypen

Die Verkehrssituation „Linksabbiegen“, die zu dem in 5.1.1 beschriebenen Unfall führen kann, ist in verschiedene Untertypen aufteilbar. Die Eigenheiten der Untertypen müssen bei der Entwicklung eines Linksabbiegeassistentzsystems berücksichtigt werden. Unterteilungen sind möglich hinsichtlich:

- des Bewegungszustandes des eigenen Fahrzeugs:
Hat der Fahrer angehalten, um auf eine Lücke im Gegenverkehr zu warten (Situation „Anfahren“) oder fährt er ohne anzuhalten durch die Kreuzung (Situation „Durchfahren“).
- der Anzahl der Gegenverkehrsspuren.
- der Anzahl der Abbiegespuren.
- der Anzahl der Zufahrten, in die nach links abgebogen werden kann.
- der Anzahl der vorfahrtsberechtigten Zufahrten.
- des Vorhandenseins und der Breite eines Mittelstreifens.

Durch Kombination dieser Merkmale ist eine große Menge verschiedener Untertypen möglich. Diese Vielfalt ist bei der Konzeption eines Linksabbiegeassistenzsystems zu berücksichtigen, wofür es zwei prinzipielle Möglichkeiten gibt:

- Ein Assistenzsystem, das universell für alle möglichen Linksabbiegesituationen funktioniert
- Parallele Entwicklung mehrerer Assistenzsysteme, die jeweils auf eine spezielle Situation zugeschnitten sind

Die parallele Entwicklung einzelner Systeme ist aufgrund der Vielzahl der möglichen Untertypen sehr aufwendig. Ein universelles Assistenzsystem stellt einen Kompromiss dar, der für die einzelnen Untertypen keine optimalen Ergebnisse liefert.

Um der potentiellen Variantenvielfalt gerecht zu werden und gleichzeitig den Entwicklungsaufwand in Grenzen zu halten, wurde ein universeller Systemansatz gewählt, der alle Situationen abdecken kann und für jede Situation nur neu parametrisiert wird.

Anhand der Einzelunfallanalyse konnte nachgewiesen werden, dass ein großer Teil der Linksabbiegeunfälle aus einfachen Situationen an einfachen Kreuzungen entsteht. Um Entwicklungszeit zu sparen wurde deshalb zuerst nur ein Parametersatz für einfache Kreuzungen mit einer Gegenverkehrsspur und keiner eigenen Linksabbiegespur entwickelt.

5.1.3 Systemdefinition und Abgrenzung

Der Linksabbiegeassistent ist an Kreuzungen aktiv, an denen der Fahrer nach links abbiegen will und keine getrennte Ampelregelung für die Linksabbieger besteht, also an den Kreuzungen, an denen der Fahrer selbst eine Lücke im Gegenverkehr wählen muss, die ausreicht, um den Abbiegevorgang durchzuführen.

Besteht Kollisionsgefahr mit Fahrzeugen, die auf der Gegenverkehrsfahrbahn entgegenkommen, und will der Fahrer trotzdem den Abbiegevorgang durchführen, handelt das System, so dass der Unfall verhindert werden kann. Es ist nicht Ziel des Systems, Kollisionen mit entgegenkommenden Radfahrern auf Radwegen und Fußgängern in einer Fußgängerfurt zu verhindern (Abgrenzung zum „Schutz für ungeschützte Verkehrsteilnehmer“).

Das System soll sowohl Unfälle verhindern, bei denen der verursachende Fahrer vor dem Linksabbiegevorgang anhält und wieder anfährt (Situation „Anfahren“), als auch solche, bei denen er ohne anzuhalten direkt durchfährt (Situation „Durchfahren“).

Viele bisherige Linksabbiegeassistenzsysteme, z.B. von SHLADOVER ET AL. [2004, S.] sind infrastruktur-basiert. Im Gegensatz dazu ist das in dieser Arbeit entwickelte System fahrzeug-basiert.

5.1.4 Machbarkeitsüberlegung

Wichtigster Teil der Fahrumgebungserfassung ist das Erkennen des Gegenverkehrs. Dabei sind heute vorhandenen Systemen Grenzen in der Reichweite gesetzt. Durch zukünftige Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ist aber eine deutliche Steigerung der Reichweite möglich.

Für Aktionen in Längsrichtung gleicht die Machbarkeitsüberlegung bezüglich der möglichen Aktorik eines Linksabbiegeassistenzsystems der des Stop-Schild-Assistent (siehe 4.1.3). Für denkbare querdynamische Eingriffe ist eine Lenkung nötig, die Lenkwinkel und Lenkmoment frei einstellen kann. Beides ist heute prinzipiell in Form von Überlagerungslenkung und elektrischer Servolenkung verfügbar. Ein Eingriff in Querrichtung wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, da ein solcher Eingriff ein hohes Risiko birgt (siehe auch 5.3.2).

Die Machbarkeitsüberlegung zeigt, dass ein Linksabbiegeassistenzsystem mit zukünftigen Systemen zur Fahrumgebungserfassung darstellbar ist.

5.2 Systemaufbau

Der Aufbau des Linksabbiegeassistenten orientiert sich an den Hauptaufgaben der Situationsinterpretation. Eine Aufgabe und damit ein Systemteil umfasst das Berechnen und Abschätzen der Kollisionswahrscheinlichkeit für den Fall, dass der Abbiegevorgang durchgeführt wird. Dazu ist sowohl das Verhalten des Fahrers des eigenen Fahrzeugs als auch das Verhalten der Gegenverkehrsfahrzeuge zu interpretieren.

Der zweite Systemteil erkennt die unmittelbare Absicht des Fahrers, den Abbiegevorgang durchzuführen. Dabei wird das Verhalten des eigenen Fahrers ausgewertet.

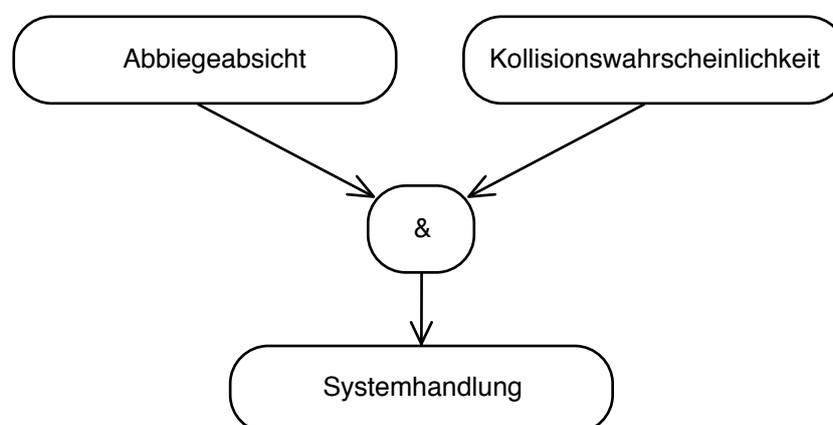


Bild 5-1: Systemaufbau des Linksabbiegeassistenten

5.3 Abbiegeabsicht

Die Abbiegeabsicht ist in generelle und unmittelbare Abbiegeabsicht aufzuteilen. Die generelle Abbiegeabsicht unterscheidet, ob der Fahrer überhaupt nach links abbiegen, oder ob er geradeaus über die Kreuzung fahren will. Sie kann beispielsweise aus der Navigationsroute, dem Blinkersignal oder dem Einordnen in die Linksabbiegespur erkannt werden. Im 3-Ebenen Modell der Fahraufgabe [u.a. DONGES 1978, S. 100 und GSTALTER 1988, S. 319] ist die generelle Abbiegeabsicht der ersten Ebene, der Navigationsebene, zuzuordnen. Im Folgenden soll die generelle Abbiegeabsicht als gegeben und bekannt vorausgesetzt werden. Die unmittelbare Abbiegeabsicht unterscheidet in der Situation Durchfahren, ob der Fahrer durch die Kreuzung fahren oder anhalten will, bzw. in der Situation Anfahren, ob er losfahren oder weiter auf eine Lücke im Gegenverkehr warten will.

Das Erkennen der Abbiegeabsicht entspricht der Situationsinterpretation beim Stop-Schild-Assistenten (siehe 4.2). In beiden Systemen wird aufgrund des Fahrerverhaltens beurteilt, ob der Fahrer richtig auf die vorhandene Situation reagiert.

Für die Situationen Anfahren und Durchfahren ist das Erkennen der Abbiegeabsicht unterschiedlich. Bei der Situation Durchfahren und einer gegebenen hohen Kollisionswahrscheinlichkeit sind die Situationen „Fahrer hält an“ (korrektes Verhalten) und „Fahrer fährt durch“ (falsches Verhalten) zu unterscheiden, ähnlich der Fahrerverhaltensanalyse beim Stop-Schild-Assistent. Die Entscheidung ob das System handelt, fällt zu einem konkreten Zeitpunkt. Bei der Situation Anfahren und hoher Kollisionswahrscheinlichkeit sind zu jedem Zeitschritt die Situationen „Fahrer wartet weiter“ (korrektes Verhalten) und „Fahrer fährt an und beginnt den Abbiegevorgang“ (falsches Verhalten) zu unterscheiden.

5.3.1 Fahrversuche zur Fahrerverhaltensanalyse

Analog zur Fahrerverhaltensanalyse beim Stop-Schild-Assistent wurden für die Fahrerverhaltensanalyse beim Linksabbiegeassistent Fahrversuche durchgeführt [CORINO 2005, S. 15]. Dazu wurden die Fahrbahnränder von sieben Kreuzungen im Norden Münchens mit Hilfe eines hochgenauen GPS-Receiver vermessen. Da RTK-DGPS (Real-Time-Kinematics Differential GPS, siehe auch [SCHULZ S. 13]) für die Messungen benutzt wurde, ist die Standardabweichung der absoluten Position der einzelnen Messpunkte kleiner als 5 cm. Die vermessenen Kreuzungen sind sämtlich Nebenstraßenkreuzungen, alle Zufahrten sind einspurig und ohne eigene Linksabbiegespur. Die Messdaten wurden manuell aufbereitet, um einzelne ungenaue Messpunkte zu entfernen.

Bei den Versuchsfahrten fuhren zwölf Probanden bis zu fünf Mal eine Testrunde, die alle sieben vermessenen Kreuzungen einschließt. Am Ende standen so 308 einzelne Abbiegevorgänge zur Verfügung. Dabei wurden folgende Größen aufgezeichnet:

- Zeitsignal
- absolute Position des Fahrzeugs (in Längen- und Breitengrad)
- Fahrtrichtung (Winkel gegen Nord)
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Beschleunigung

- Gaspedalstellung
- Bremsdruck
- Lenkradwinkel

Die Fahrzeugposition und Richtung wurden mit einer DGPS-gestützten Kreiselplattform gemessen, die sowohl eine hohe absolute Positionsgenauigkeit mit einer Standardabweichung kleiner 5 cm erreicht als auch hohe Abtastraten bis zu 100 Hz erlaubt.

Vom Versuchsleiter wurde während der Versuchsfahrt die Verkehrssituation beurteilt und anhand folgender Unterscheidungen codiert:

- Entgegenkommende Fahrzeuge: Ja/nein
- Fußgänger, die das Fahrerverhalten beeinflussen ja/nein
- Vorfahrtsberechtigzte Fahrzeuge von rechts bei X-Kreuzungen: Ja/nein
- andere Fahrzeuge, die das Fahrerverhalten beeinflussen: Ja/nein

5.3.2 Der richtige Handlungspunkt und der richtige Handlungsgrad

Handlungspunkt und Handlungsgrad (Warnung, Unterstützung oder Eingriff) sind direkt voneinander abhängig (siehe 4.2.1). Beim Stop-Schild-Assistent wird der letzte Handlungspunkt ausgehend von einem festen Bezugspunkt, der Haltelinie berechnet. Beim Linksabbiegeassistent ist ein vergleichbarer Bezugspunkt der Punkt, ab dem das eigene Fahrzeug in die Gegenverkehrsfahrbahn eindringt (letzter Haltepunkt). Dieser Bezugspunkt kann im Gegensatz zum Bezugspunkt beim Stop-Schild-Assistent nicht eindeutig festgelegt werden.

Bild 5-2 zeigt die mögliche Variation der Trajektorie, die der Fahrer zum Linksabbiegen wählen kann (siehe auch [MEITINGER ET AL. 2006, S. 6]). Mit der Variation der Trajektorie verschiebt sich auch der letzte Haltepunkt.

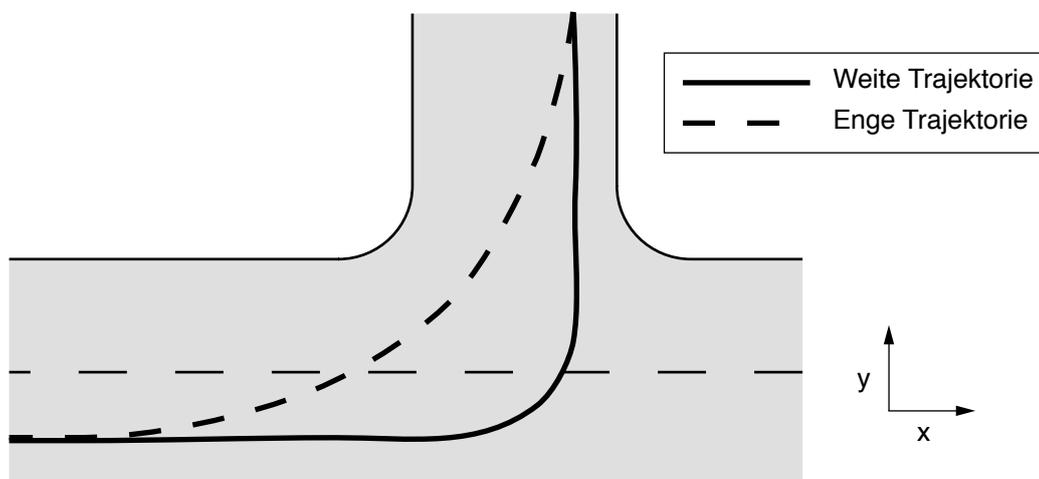


Bild 5-2: Bereich der Trajektorienwahl beim Linksabbiegen

Der Abstand des letzten Haltepunkts bei enger Trajektorie vom Haltepunkt bei weiter Trajektorie ist in vielen Fällen größer als der Anhalteweg bei den typischen Geschwindigkeiten bei einem Linksabbiegevorgang.

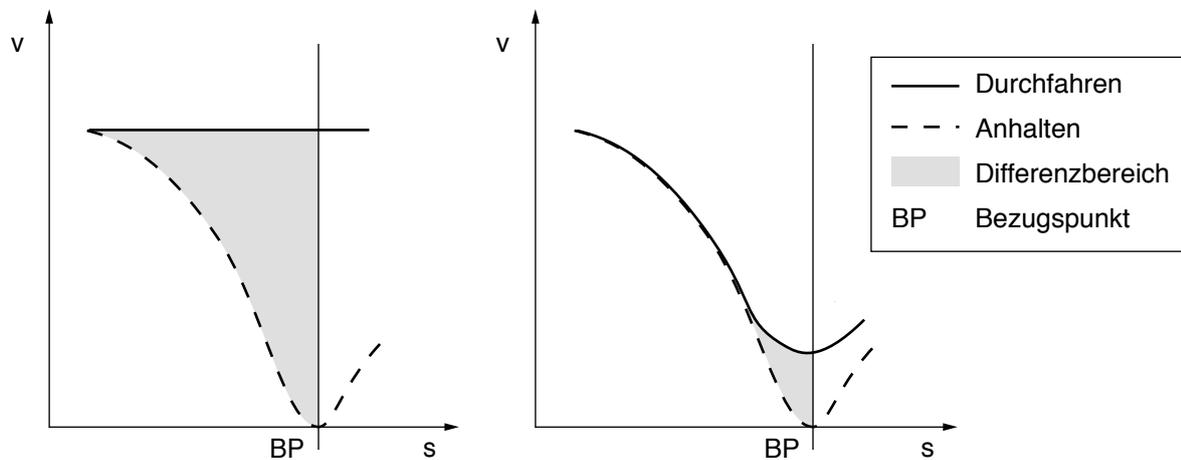


Bild 5-3: Typische Geschwindigkeitsprofile für Durchfahren und Anhalten bei Stop-Schildern (links) und Linksabbiegen (rechts)

Eine weiterer Unterschied zum Stop-Schild-Assistent, der die Situationsinterpretation erschwert, ist die geringe Differenz zwischen dem Fahrerverhalten beim Durchfahren und beim Anhalten (siehe Bild 5-3). Bei einem typischen Linksabbiegevorgang verzögert der Fahrer das Fahrzeug auch dann, wenn er nicht anhalten will. Dadurch ist es erst in geringerem Abstand zum letzten Haltepunkt möglich, die Situationen mit vergleichbarer Sicherheit zu unterscheiden.

Soll das Assistenzsystem bei engen Trajektorien wirksam sein, muss ein Bezugspunkt für enge Trajektorien gewählt werden (Punkt BP_e in Bild 5-4). Eine Entscheidung über die Handlung muss an der zugehörigen Warnkurve fallen (Punkt EP in Bild 5-4). Im Beispiel des eingezeichneten Geschwindigkeitsverlauf im Bild 5-4 plant der Fahrer eine weite Trajektorie zu fahren und korrekt anzuhalten. Die korrekte Anhalteabsicht ist am Entscheidungspunkt EP nicht zu erkennen, eine False-Positive-Handlung ist die Folge.

Wird die Warnkurve eines Bezugspunkts für weite Trajektorien gewählt (Punkt BP_w in Bild 5-4), handelt das System in den Fällen zu spät, in denen der Fahrer eine enge Trajektorie wählt.

Wird als Systemhandlung ein aktiver Bremseneingriff durchgeführt, muss die Entscheidung über den Eingriff erst an der jeweiligen Bremskurve getroffen werden. Das Dilemma bleibt dennoch bestehen. So kann beim in Bild 5-4 eingezeichneten Geschwindigkeitsverlauf auch an der zu BP_e gehörigen Bremskurve die Anhalteabsicht nicht erkannt werden.

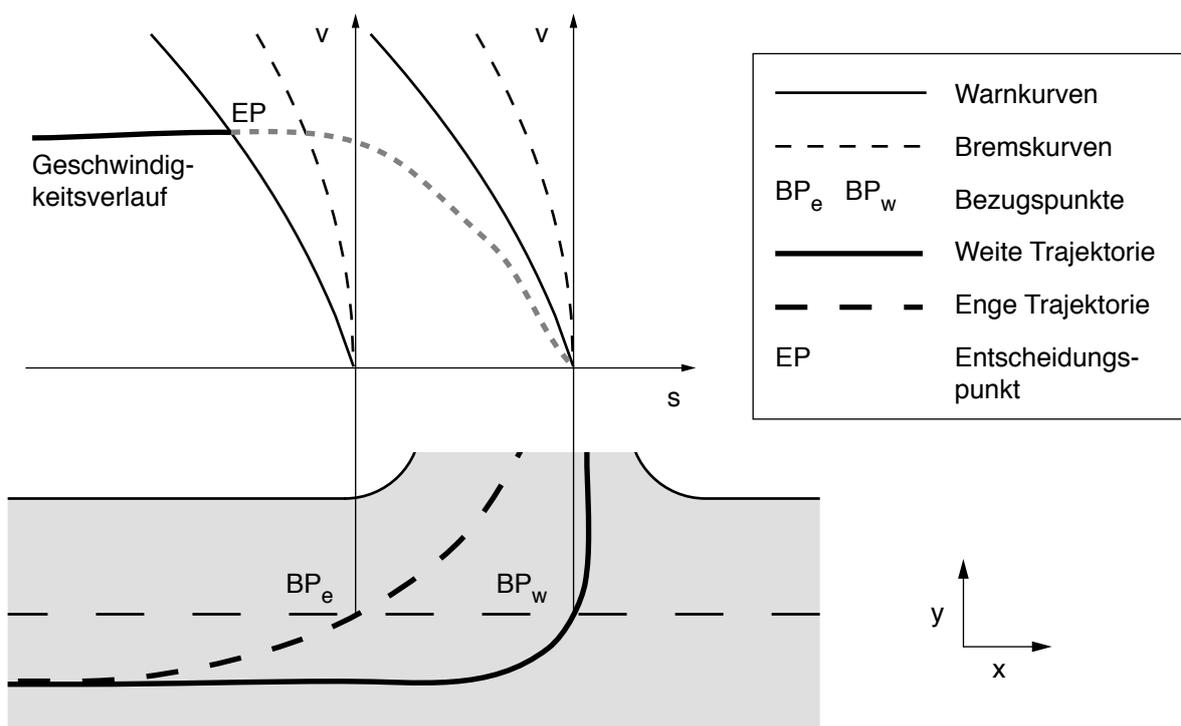


Bild 5-4: Variation des Bezugspunkts für die Berechnung des letzten Brems- und Warnpunkts

Eine Möglichkeit zur Lösung des Dilemmas ist, den Systemeingriff nicht auf die Längsdynamik zu beschränken sondern auch in Querrichtung einzugreifen. Eingriffe in die Fahrzeugquerrichtung bergen aber, gerade im höher- und hochdynamischen Bereich Aktiver Sicherheitssysteme und in höchst komplexen Umgebungen wie Kreuzungen, ein wesentlich größeres Risiko als Eingriffe in Längsrichtung. Deswegen soll der Eingriff in Querrichtung hier nicht weiter betrachtet werden.

Das Dilemma wird gelöst, indem der Punkt, an dem die Entscheidung über einen Systemeingriff fällt, anders als beim Stop-Schild-Assistent, nicht über einen festen Bezugspunkt festgelegt wird.

Den entscheidenden Einfluss auf den Punkt, an dem eine Entscheidung notwendig ist, hat die Trajektorienplanung des Fahrers. Die Fahrerverhaltensanalyse kann die Trajektorienplanung, das heißt die Absicht des Fahrers eine enge oder weite Trajektorie zu wählen, erst erkennen, wenn der Fahrer den Abbiegevorgang tatsächlich beginnt. Die Situationsinterpretation erfolgt in zwei Stufen. Die erste Stufe erkennt den Beginn des Abbiegevorgangs (siehe 5.3.3). Ist der Beginn erkannt, entscheidet die zweite Stufe, ob der Fahrer anhalten oder durchfahren will (5.3.4). Der Entscheidungspunkt wird nicht über eine Berechnung festgelegt, wo die Entscheidung spätestens nötig ist, sondern über den Punkt, an dem die Entscheidung überhaupt mit ausreichender Sicherheit getroffen werden kann. Der Anhalteweg, der am Entscheidungspunkt noch zur Verfügung steht, ist nicht definiert. Damit ist auch nicht festgelegt, mit welcher Systemhandlung (Warnung oder autonome Bremsung) das Fahrzeug noch innerhalb des zur Verfügung stehenden Wegs angehalten werden kann.

5.3.3 Beginn des Abbiegevorgangs

Die erste Stufe der Detektion der Abbiegeabsicht ist, den Beginn des Abbiegevorgangs (Abbiegebeginn) zu detektieren. Damit wird erkannt, ob der Fahrer eine enge oder eine weite Trajektorie wählt (vgl. Bild 5-2). Das Dilemma, dass kein letzter Haltepunkt als Bezugspunkt für das Berechnen des Entscheidungspunkts bestimmt werden kann, wird so umgangen. Die Entscheidung über eine Systemhandlung erst am Abbiegebeginn ist zeitkritisch. Der Abbiegebeginn muss deshalb mit möglichst geringer Zeitverzögerung erkannt werden.

Der Abbiegebeginn wird in zwei Stufen ermittelt. In einer ersten Stufe wird ein Einlenkpunkt ermittelt, in der zweiten Stufe wird der Einlenkpunkt von einem Neuronalen Netz bewertet und entschieden, ob der Einlenkpunkt tatsächlich den Abbiegebeginn kennzeichnet.

5.3.3.1 Finden eines Einlenkpunkts

Als Indikator für den Einlenkpunkt, wird der Lenkradwinkel benutzt. Der Lenkradwinkel gibt unmittelbar die Fahrereingabe wieder. Andere Maße, die den Abbiegebeginn andeuten, wie Giergeschwindigkeit oder Querschleunigung, sind durch das Reaktionsverhalten des Fahrzeugs verzögert. Ausgewertet werden folgende Daten:

- Lenkradwinkel δ
- Lenkradgeschwindigkeit $\dot{\delta}$
- Lenkradbeschleunigung $\ddot{\delta}$

Die konkreten Schwellenwerte, ab denen ein Einlenkpunkt erkannt wird, sind von den Fahrzeugparametern wie Lenkübersetzung und Radstand abhängig.

Bild 5-5 und Bild 5-6 zeigen Abbiegevorgänge aus den durchgeführten Fahrversuchen (vgl. 5.3.1). Die Beispiele zeigen, dass die gewählte Kombination der Parameter für einen weiten Bereich des Fahrerverhaltens signifikant ist. Der Einlenkpunkt wird sowohl im Fall Anfahren und weite Trajektorie (Bild 5-5) als auch im Fall Durchfahren und enge Trajektorie (Bild 5-6) gefunden. Alle drei Parameter zeigen auch bei etwas unruhigerem Lenkverhalten, wie es in Bild 5-6 auftritt, am Einlenkpunkt einen deutlichen Anstieg.

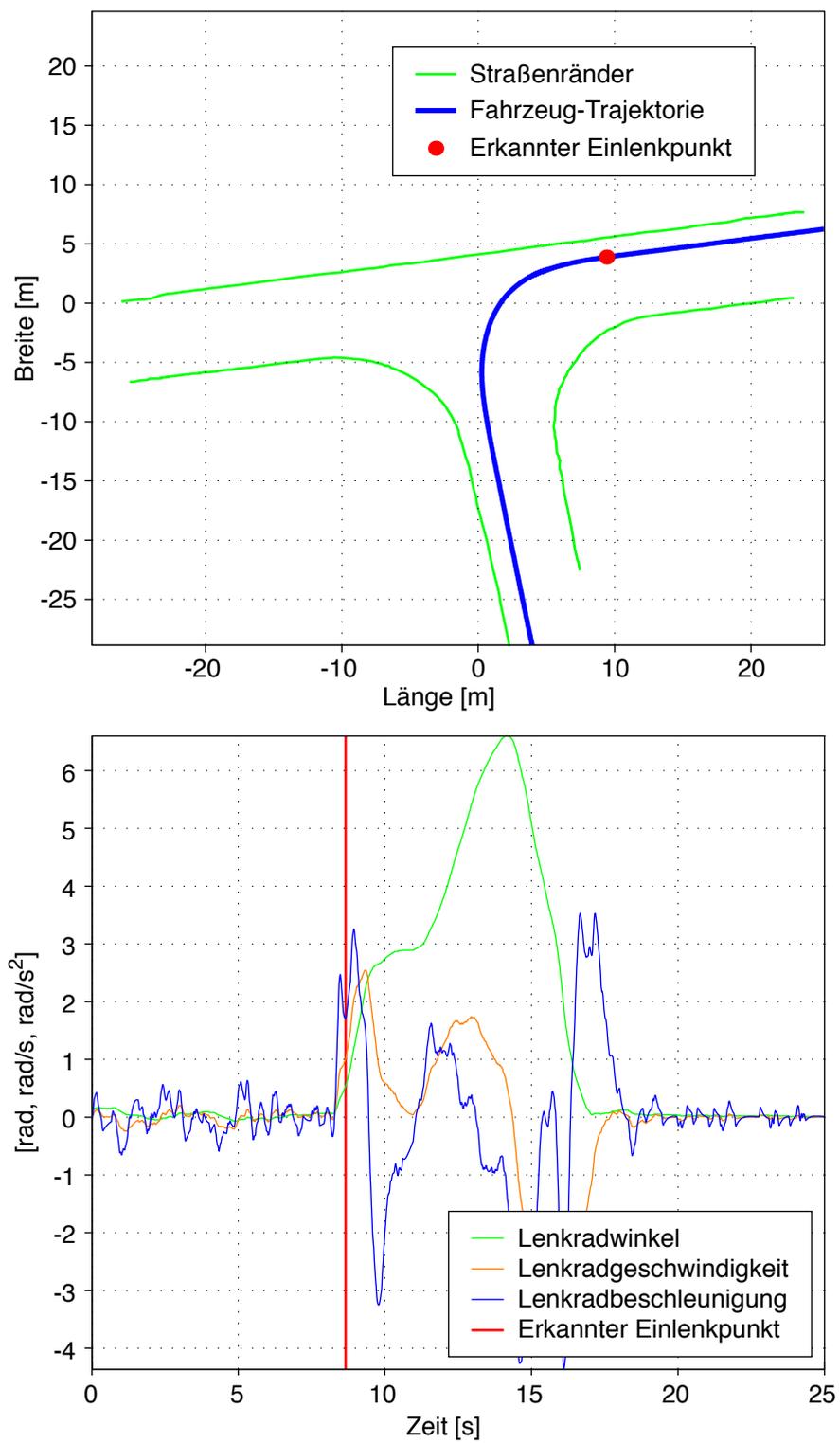


Bild 5-5: Erkannter Einlenkpunkt bei Trajektorie mit Anhalteabsicht

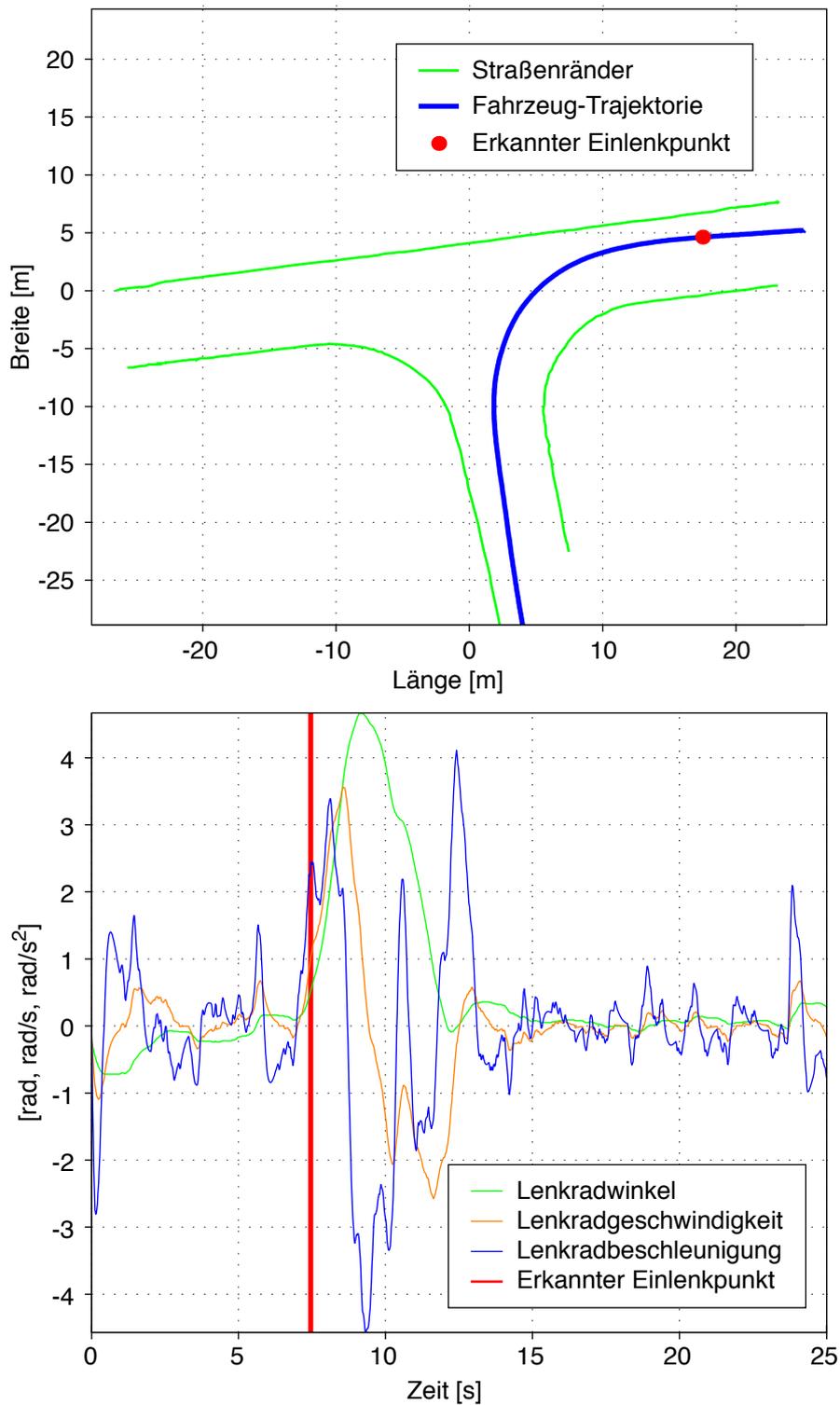


Bild 5-6: Erkannter Einlenkpunkt bei Trajektorie mit Durchfahrabsicht

5.3.3.2 Bewerten des Einlenkpunkts

Obwohl die Einlenkpunkte mit den gezeigten Lenkrad-Parametern gut erkannt werden, ist eine fehlerhafte Erkennung nicht ausgeschlossen. Bild 5-7 zeigt ein Beispiel aus den durchgeführten

Fahrversuchen, in dem kurz vor der Kreuzung ein fahrender Bus überholt wurde. Nach dem Wiedereinschwenken in die eigene Spur, lenkte der Fahrer nach links, um seinen Kurswinkel zu korrigieren. An dieser Stelle werden die gewählten Schwellen der genannten Parameter erreicht (siehe Bild 5-7 rechts) und ein Einlenkpunkt wird erkannt. Der Einlenkpunkt, der den Beginn des Linksabiegemanövers darstellt, findet sich erst später.

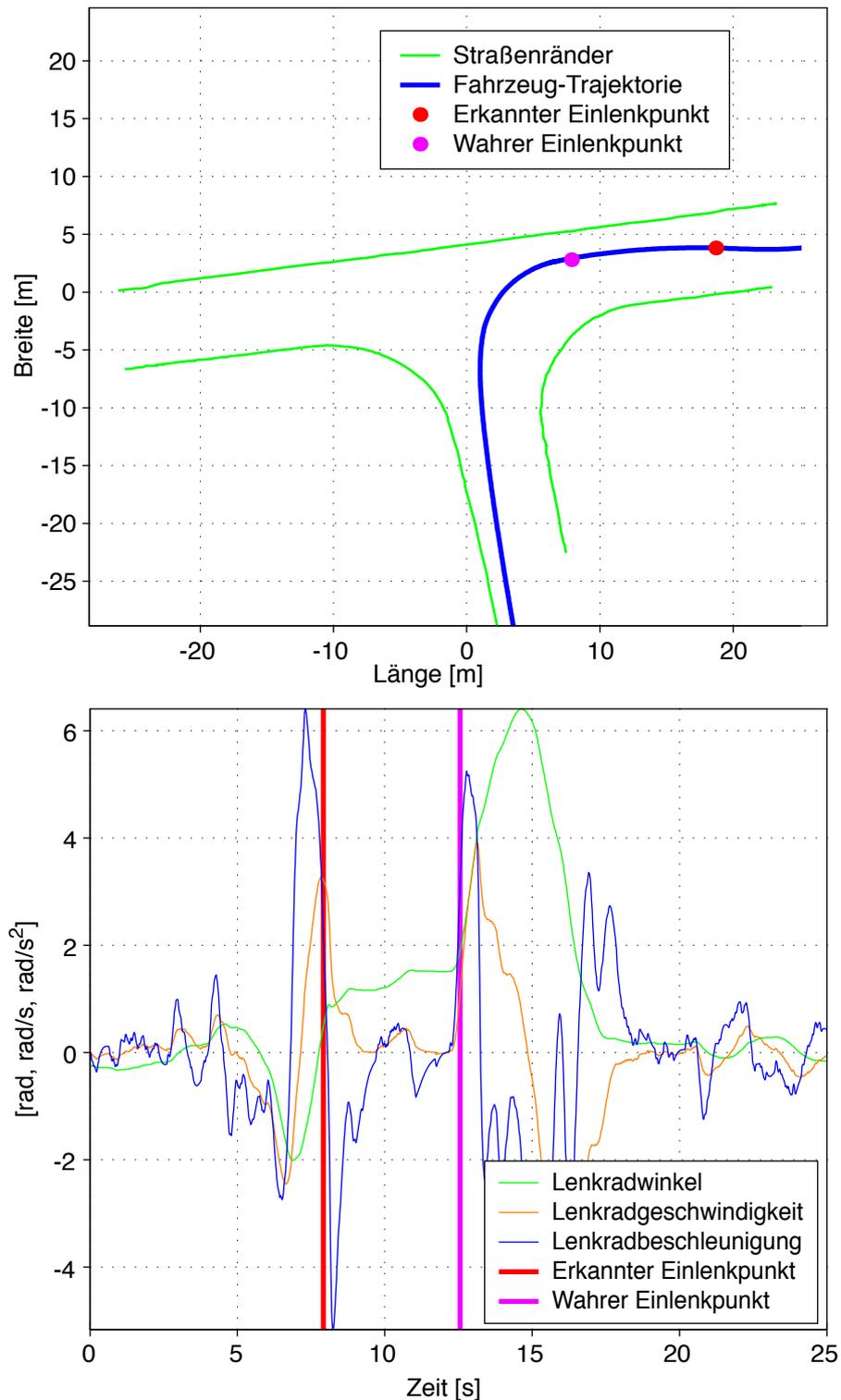


Bild 5-7: Falsch erkannter Einlenkpunkt und wahrer Einlenkpunkt

Einlenkpunkte werden deshalb zusätzlich von einem Neuronalen Netz analysiert und bewertet, um Spezialfälle wie in Bild 5-7 zu erkennen und die mögliche False-Positive-Auslösung zu verhindern.

Wird ein Einlenkpunkt in Kreuzungsnähe (Entfernung zur Kreuzungsmitte < 25 m) gefunden, unterscheidet das Neuronale Netz, ob der Einlenkpunkt tatsächlich der Beginn des Abbiegevorgangs ist oder ob nur ein Manöver zur Kurskorrektur oder ein vergleichbares Manöver durchgeführt wurde. Es wurden zwei Typen Neuronaler Netze erzeugt und trainiert, ein Multi-Layer-Perceptron (siehe KRATZER [1993, S. 71] und KRUSE ET AL. [1995, S. 71]) und ein Fuzzy-Netz (siehe 4.2.4.1). Den Netzen standen folgende in Bild 5-8 dargestellte Eingangskriterien zur Verfügung [CORINO 2005, S. 32]:

- Kurswinkel φ :
Der Winkel zwischen der Fahrzeugachse und der Straße an der Stelle, an der sich das Fahrzeug befindet. Der globale Kurswinkel des Fahrzeugs wird von der Kreiselform bestimmt. Der Winkel der Straße wird aus den vermessenen Straßenberandungen berechnet.
- Charakteristischer Radius der Kreuzung r_K :
Der charakteristische Radius (siehe Bild 5-8) ist ein einfaches Maß, das anzeigt, wie eng der Fahrer die Kreuzung durchfahren kann, d.h. wie stark die Kurve angeschnitten werden kann. Er wird aus den vermessenen Straßenberandungen bestimmt.
- Entfernung von der Kreuzung d_K :
Die Entfernung des eigenen Fahrzeugs von der Kreuzung ist zusammen mit dem charakteristischen Radius ein Maß, ob der Einlenkpunkt in einem Bereich an der Kreuzung erfolgt, der für den Abbiegebeginn typisch ist.
- Laterale Position der linken vorderen Fahrzeugecke d_{lv} :
Sie zeigt den lateralen Abstand der linken vorderen Fahrzeugecke von der Mittellinie der Straße und gibt zusammen mit dem Kurswinkel φ ein Maß für die laterale Position des Fahrzeugs auf der Fahrbahn. Die Mittellinie der Straße wird, wenn sie nicht direkt vermessen wurde, aus den Straßenberandungen berechnet. Die Position der Fahrzeugecke wird aus den Positionsdaten des Fahrzeugs und dem Kurswinkel berechnet.

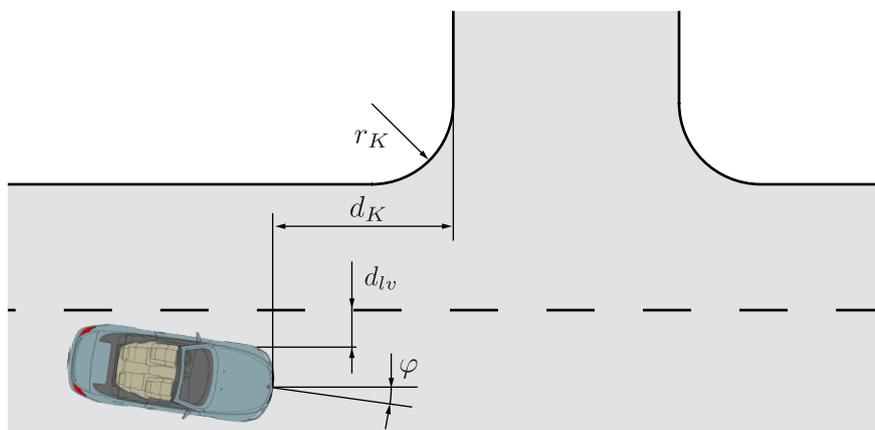


Bild 5-8: Eingangswerte des Neuronalen Netzes zum Erkennen eines Abbiegepunkts

5.3.3.3 Wirksamkeit und Handlungsart

Das Aktive Sicherheitssystem Linksabbiegeassistent ist nur wirksam, wenn das Fahrzeug bei einer Systemhandlung noch auf der eigenen Fahrspur zum Stillstand kommt oder nur minimal in die Gegenverkehrsfahrbahn eindringt. Während beim Stop-Schild-Assistent der Entscheidungspunkt über die Wirksamkeit festgelegt wird (siehe 4.2.1), ist der Entscheidungspunkt bei der Linksabbiegeassistent und damit der frühestmögliche Beginn einer Systemhandlung, der Abbiegepunkt. Um die Wirksamkeit möglicher Systemhandlungen zu überprüfen, wurden die Daten der Fahrversuche benutzt. Für jeden Abbiegevorgang vom Typ „Durchfahren“ wurde nach dem beschriebenen Verfahren der Abbiegepunkt bestimmt. Vom Abbiegepunkt ausgehend, wurde entlang der weiter gefahrenen Trajektorie der Anhalteweg abgetragen. Anhand dieser theoretischen Stillstandsposition und dem zugehörigen Kurswinkel wurde die laterale Lage des kritischen vorderen linken Fahrzeugecks zur Straßenmitte bestimmt.

Diese Berechnung enthält die Annahme, dass das Fahrzeug nach Beginn einer Systemhandlung die gleiche Trajektorie zurücklegt, wie bei freiem Abbiegen während der Fahrversuche, d.h., dass der Fahrer sein Lenkverhalten über dem Weg nicht ändert. Da das Fahrzeug nach Beginn der Systemhandlung gebremst wird, ist diese Annahme gleichbedeutend mit der Annahme, dass der Fahrer langsamer einlenkt. Dies ist mit der zu erwartenden Reaktion der Fahrer auf eine Systemhandlung konform.

Bei einer Warnung als Systemhandlung wurde der Anhalteweg s_a mit der Reaktionszeit des Fahrers t_r von 1 s und einer konstanten Verzögerung a_b vom 6 m/s^2 berechnet. Diese Annahmen sind gleich denen der Stop-Schild-Assistent, die durch die Versuche bestätigt werden konnten (siehe 4.5.1). Bild 5-9 zeigt die kumulierte Verteilung der Stillstandsposition der linken vorderen Fahrzeugecke der ausgewerteten Versuchsfahrten. In keinem Fall hätte der Fahrer das Fahrzeug nach einer Warnung und den beschriebenen Annahmen vollständig auf der ursprünglichen Fahrspur zum Stillstand bringen können. Die durchschnittliche Eindringtiefe in die Gegenverkehrsfahrbahn beträgt etwa 2 m. In über 80 % der Fälle ist die Eindringtiefe größer als 1 m. Bei dieser Eindringtiefe muss davon ausgegangen werden, dass der Unfall nur noch in sehr wenigen Fällen verhindert werden kann. Eine Warnung ist deshalb als nicht wirksam anzusehen.

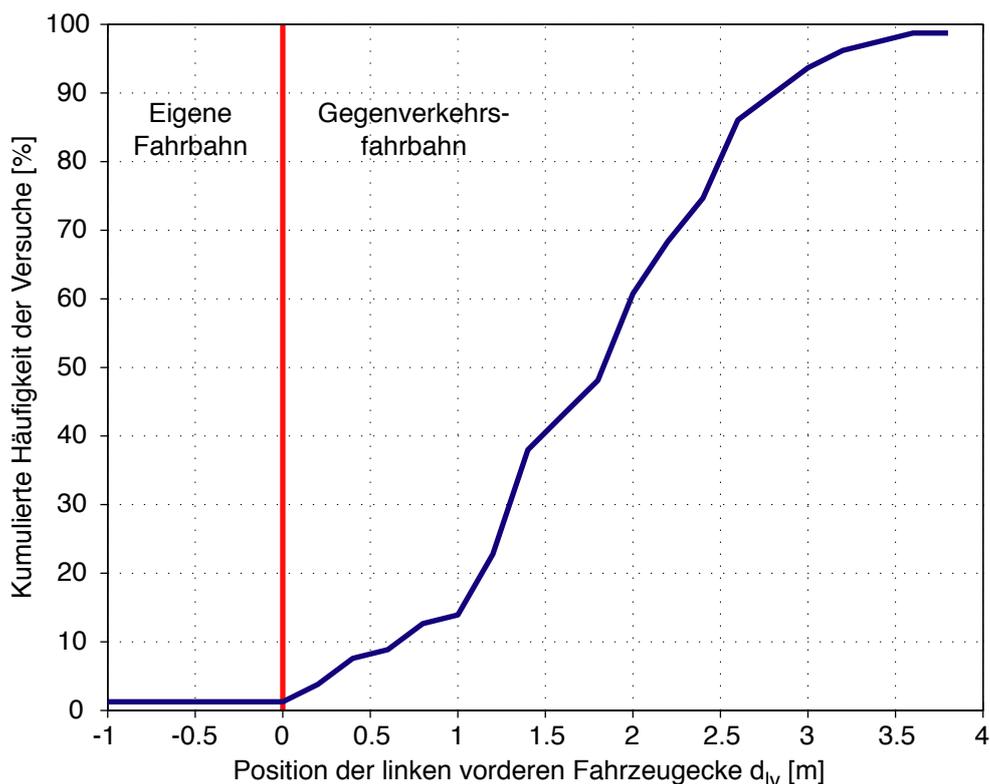


Bild 5-9: Position der linken vorderen Fahrzeugecke bei Stillstand nach Warnung (kumulierter Anteil der Versuche)

Die Stillstandsposition wurde auch bei einer autonomen Bremsung als Systemhandlung berechnet. Dabei wurde ebenfalls eine konstante Bremsverzögerung a_b von 6 m/s^2 angenommen, die verzögerungsfrei eingestellt wird. Bild 5-10 zeigt die kumulierte Verteilung der linken vorderen Fahrzeugecke nach einer autonomen Bremsung. In über 80 % der Fälle bleibt das Fahrzeug komplett im sicheren Bereich, in 95 % der Fälle dringt die linke vordere Fahrzeugecke nicht weiter als 20 cm in die Gegenfahrbahn ein. Es kann daher angenommen werden, dass mit einer autonomen Bremsung mit 6 m/s^2 etwa 80 bis 95 % der Unfälle zu verhindern sind. Damit ist es möglich, den Abbiegepunkt als Entscheidungspunkt zu nutzen, wenn eine autonome Bremsung als Systemhandlung genutzt wird. Die Durchschnittsgeschwindigkeit der Abbiegevorgänge aus den Versuchen entspricht mit etwa 23 km/h der durchschnittlichen Ausgangsgeschwindigkeit bei den Verursachern von Linksabbiegeunfällen in der GIDAS-Datenbank (siehe 3.2.3.2). Die Abschätzung der Wirksamkeit ist deshalb auch für das Unfallgeschehen in der GIDAS-Datenbank gegeben.

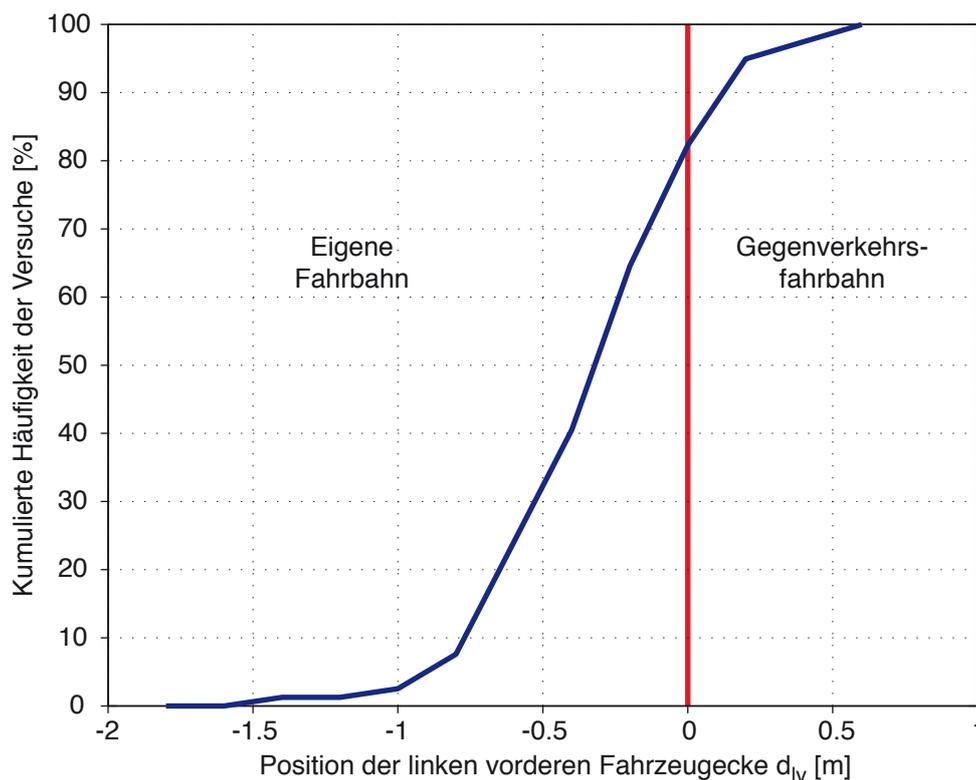


Bild 5-10: Position der linken vorderen Fahrzeugecke bei Stillstand nach autonomer Bremsung (kumulierter Anteil der Versuche)

Der große Unterschied in der Wirksamkeit zwischen Warnung und autonomer Bremsung kann mit der geringen Geschwindigkeit beim Abbiegevorgang und der Fahrzeugreaktion auf das Einlenken erklärt werden. Während sich der Bremsweg quadratisch zur Geschwindigkeit verhält, verhält sich der Reaktionsweg linear. Bei Geschwindigkeiten kleiner 12 m/s ist der Reaktionsweg bei den angenommenen Werten für a_b und t_r länger als der Bremsweg. Bei der durchschnittlichen Abbiegegeschwindigkeit in den Versuchsdaten von 6,4 m/s ist der Reaktionsweg ca. 1,9 mal so lang wie der Bremsweg. Das heißt, dass der Anhalteweg bei einer Warnung im typischen Geschwindigkeitsbereich für Linksabbiegevorgänge fast drei Mal so lang ist wie bei einer autonomen Bremsung. Zusätzlich ist die laterale Bewegung der kritischen linken vorderen Fahrzeugecke nach Beginn des Einlenkens in etwa eine Funktion dritter Ordnung des Fahrzeugwegs, längere Anhaltewege wirken sich also stark überproportional aus.

Als möglicher Schritt zwischen Warnung und autonomer Bremsung wird bei aktiven Sicherheitssystemen die Unterstützung des Fahrers durch Anbremsen oder einen Bremsruck benutzt. Dabei wird das Fahrzeug autonom gebremst, die Bremse wird jedoch nach einer kurzen Zeit automatisch wieder gelöst und der Fahrer muss, wenn nötig, das Bremsen übernehmen. Der Bremsruck zielt darauf ab, durch die kinesthetische Einwirkung auf den Fahrer die Reaktionszeit zu verkürzen. Gleichzeitig soll der Bremsruck das Fahrzeug während der Reaktionszeit des Fahrers verzögern und damit den Anhalteweg, je nach Stärke und Dauer des Bremsrucks, bis auf den der autonomen Bremsung verkürzen. Im gezeigten Fall besteht bei einer autonomen Bremsung kein großer Spielraum (siehe Bild 5-10). Schon eine geringe Verlängerung des Anhaltewegs würde die Wirksamkeit deutlich senken, deshalb muss der Bremsruck die volle Länge der Reaktionszeit des Fahrers über-

brücken und die gleiche Verzögerung von $a_b = 6 \text{ m/s}^2$ wie die autonome Bremsung aufweisen. Dies bedeutet aber, dass in den Fällen, in denen bei Auslösung des Assistenten die Fahrzeuggeschwindigkeit kleiner 6 m/s ist, das Fahrzeug bereits während des Bremsrucks zum Stillstand kommt. Somit besteht in einer großen Zahl der Linksabbiegesituationen kein Unterschied zwischen der autonomen Bremsung und einem wirksamen Bremsruck. Um dem Fahrer nicht durch die zusätzliche Systemgrenze zu belasten, wurde zugunsten der autonomen Bremsung auf einen unterstützenden Bremsruck verzichtet.

5.3.3.4 Systemgrenzen und Eingriffsdilemma

Bild 5-10 zeigt, dass trotz des autonomen Bremseneingriffs das Fahrzeug nicht in allen Fällen außerhalb der Gefahrenzone zum Stillstand gebracht werden kann. Der Grund dafür liegt im Informationsdefizit über das zukünftige Fahrerverhalten zum Zeitpunkt des Eingriffs und wird in Anlehnung an das Warndilemma (siehe 4.2.1) „Eingriffsdilemma“ genannt.

Das Warndilemma entsteht bei einem Warnsystem, weil die Systemhandlung am letzten Warnzeitpunkt erfolgen muss, wenn kein korrektes Fahrerverhalten erkennbar ist. Der Fahrer kann aber beabsichtigen, erst später, maximal am letzten Eingriffspunkt, zu reagieren. Am letzten Warnpunkt hat die Fahrerverhaltensanalyse keine Information, wie sich der Fahrer zwischen letztem Warnpunkt und letztem Bremspunkt verhalten will. Dieses Informationsdefizit ist die Ursache des Warndilemmas. Das Informationsdefizit wird beim Stop-Schild-Assistent umgangen, indem ein Standardfahrerverhalten angenommen wird, nämlich, dass der Fahrer bei korrektem Verhalten vor dem letzten Warnpunkt eine messbare Reaktion zeigt. Die fehlende Information wird durch ein Modellverhalten ersetzt. Aus dem Fahrerverhalten bis zum letzten Warnpunkt wird auf das zukünftige Fahrerverhalten und somit letztlich auf die Fahrerabsicht geschlossen. Das Warndilemma tritt nur auf, wenn der Fahrer vom Modellverhalten abweicht.

Ein vergleichbares Informationsdefizit besteht auch beim Eingriffsdilemma im Fall des Linksabbiegeassistenten. Die Gefährdung beim Linksabbiegen ist stärker von der Querdynamik als von der Längsdynamik des abbiegenden Fahrzeugs abhängig. Ein Eingriff ist nur in die Längsdynamik möglich, die Querführung des Fahrzeugs bleibt dem Fahrer vorbehalten (siehe 5.3.3.3). Die Fahrerabsicht über das zukünftige Querdynamikverhalten (also das Lenkverhalten) ist für das System am Entscheidungspunkt nicht erkennbar. Die fehlende Information wird durch ein Modell ersetzt. Das Modell enthält die Annahme, dass der Fahrer abbiegen will, wenn ein Abbiegepunkt erkannt wird, und dass eine autonome Bremsung ausreichend ist, um im Fall eines Fahrerfehlers einen Zusammenstoß mit entgegenkommenden Fahrzeugen zu verhindern.

Hier sind Modellfehler in zwei Richtungen möglich:

- Der Fahrer lenkt schneller ein als angenommen, der Weg in die Gefahrenzone wird verkürzt, der Anhalteweg reicht nicht aus, das System kann den Unfall nicht verhindern, obwohl eine autonome Bremsung ausgelöst wird (Bild 5-11: Schnelles Einlenken).
- Der Fahrer schätzt die Situation richtig ein und will anhalten, stellt aber trotzdem kurzzeitig Parameter ein, die das System einen Abbiegepunkt erkennen lassen. Der Fahrer hat nicht die Absicht, weiter einzulenken, sondern will anzuhalten, die Situation ist deshalb

nicht kritisch. Am erkannten Abbiegepunkt ist dies jedoch nicht festzustellen, eine False-Positive-Auslösung ist die Folge (Bild 5-11: Kein weiteres Einlenken).

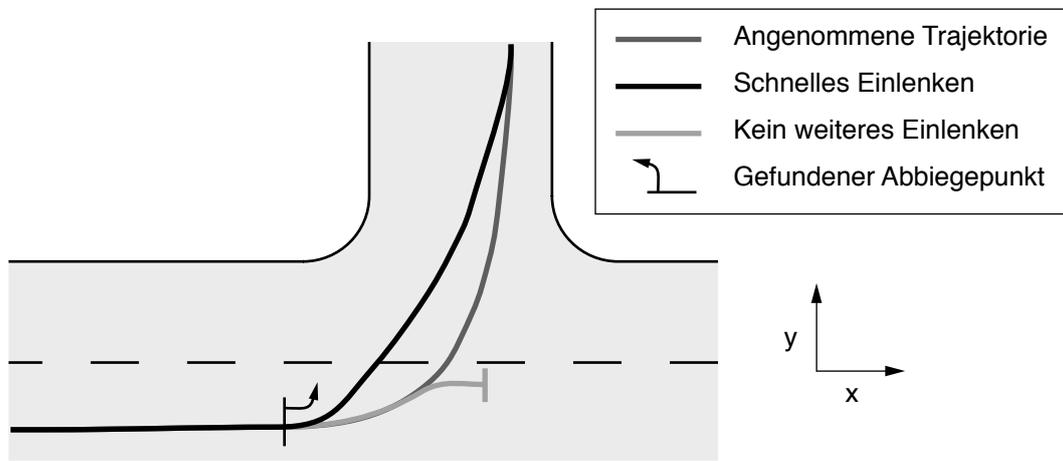


Bild 5-11: Eingriffsdilemma: Verschiedene Trajektorien trotz gleichem gefundenen Abbiegepunkt

Die Parameter der Modellannahme, die über das zukünftige Lenkverhalten an einem erkannten Abbiegepunkt getroffen wird, beeinflussen maßgeblich, ob das System sehr aktiv ausgelegt ist, d.h. oft eingreift, oder sehr passiv ausgelegt ist, also sehr selten eingreift. Die Auslegung liegt dabei zwischen folgenden in der Praxis nicht sinnvollen Extremfällen:

- Es wird (fahr-dynamisch) maximal mögliches Lenkverhalten in Richtung höherer Gefahr angenommen. Ein Großteil der Linksabbiegevorgänge wird damit als gefährlich eingestuft. Diese Auslegung verhindert (bei theoretisch perfekter Umfelderkennung) alle Linksabbiegeunfälle, provoziert aber eine maximale Anzahl von False-Positive-Eingriffen.
- Es wird (fahr-dynamisch) maximal mögliches Lenkverhalten in Richtung Gefahrvermeidung angenommen. Bei dieser Auslegung handelt das System nur bei praktisch unvermeidbaren Unfällen. Bei theoretisch perfekter Umfelderkennung kommen False-Positive-Eingriffe nicht vor. Da das Fahrerverhalten in Wirklichkeit nie optimal in Richtung Gefahrvermeidung ist, werden Kollisionen so gut wie nie vermieden, d.h. das System verringert meist nur die Kollisionsschwere. Dies ist bei Linksabbiegeunfällen jedoch nicht zielführend, da der Hauptteil des Energieeintrags vom Gegenverkehr stammt.

Der erste Extremfall bedeutet, dass das System in Kreuzungsnähe bei Gegenverkehr nur Fahrgeschwindigkeiten zulässt, die so klein sind, dass der Fahrer auch bei maximalem Einlenken die Gegenverkehrsfahrbahn nicht erreichen kann. Die Auslegung mit dieser erheblichen Einschränkung ist gleichzeitig die einzig mögliche, in der das System im Sinne der konstruktiven funktionalen Sicherheit [MARTINUS 2005, S. 32] missbrauchsicher gestaltet werden kann. In einer praktikablen Auslegung, wie sie anhand der Fahrversuche getroffen wurde (siehe 5.3.3.3), ist konstruktive Sicherheit gegen vorsätzlichen Missbrauch durch den Fahrer, bei der Beschränkung auf den Eingriff in Längsrichtung, nicht darstellbar. Der Missbrauch muss daher durch zusätzliche Maßnahmen, z.B. entsprechende Hinweise, verhindert werden.

5.3.4 Anhalteabsicht

Die zweite Stufe der Situationsinterpretation erkennt am Abbiegepunkt, ob der Fahrer anhalten oder ob er ohne anzuhalten durch die Kreuzung fahren will. Für diesen Schritt wurden zwei unterschiedliche Neuronale Netze der Typen Multi-Layer-Perceptron (MLP, siehe [KRATZER 1993, S. 71] und [KRUSE ET AL. 1995, S. 71]) und Fuzzy-Logic-Netz (siehe 4.2.4.1) erzeugt und trainiert. Zum Training der Netze wurden die Versuchsdaten aus 5.3.1 benutzt. In vielen der Versuchsfälle halten Fahrer, die ein Gegenverkehrsfahrzeug passieren lassen, nicht vollständig an. Die Parameter dieser Fälle am Abbiegepunkt gleichen aber denjenigen, bei denen die Fahrer das Fahrzeug vollständig zum Stillstand bringen. Für die Versuchsdaten wurde die Grenze von 7 km/h festgelegt, kleinere Geschwindigkeiten gelten als angehalten. Der Bremsweg bei einer autonomen Bremsung beträgt bei 7 km/h noch 31 cm und die Betrachtung der Kollisionswahrscheinlichkeit ist unterhalb dieser Geschwindigkeit mit dem Modell „Anfahren“ genauer als mit dem Modell „Durchfahren“ (siehe 5.4.3.3), so dass diese Näherung sinnvoll ist. Die Neuronalen Netze wurden trainiert, folgende Fälle zu unterscheiden:

- Durchfahren:
Der Fahrer fährt ohne anzuhalten durch die Kreuzung. Die Geschwindigkeit ist weder vor noch nach dem Abbiegepunkt kleiner als 7 km/h.
- Anhalten:
Der Fahrer hat nach oder direkt am Abbiegepunkt aber noch vor Erreichen der Gegenfahrbahn eine Geschwindigkeit kleiner 7 km/h.

Folgende Kriterien dienen als Eingangsdaten für die Netze [CORINO 2005, S. 43]:

- Aktuelle Geschwindigkeit v_{ego}
- Aktuelle Beschleunigung a_{ego}
- Maximale Geschwindigkeit für das Abbiegen auf einer Kreisbahn:
Der Radius einer Kreisbahn, mit der von der aktuellen Fahrzeugposition aus der Abbiegevorgang beendet werden kann, so dass das Fahrzeug genau die Zielspur trifft, wird berechnet. Die Geschwindigkeit, bei der auf einer Kreisbahn mit diesem Radius eine Querschleunigung von 7 m/s^2 auftritt, wird als maximale Geschwindigkeit für das Abbiegen angenommen.

5.3.5 Anfahrsabsicht

In der Situation „Anfahren“ muss entsprechend der Anhalteabsicht die Absicht des Fahrers erkannt werden, den Abbiegevorgang zu beginnen („Anfahrsabsicht“). In der Prototyp-Umsetzung wird die Anfahrsabsicht erkannt, wenn der Fahrer gleichzeitig folgende Parameter einstellt:

- Geschwindigkeit $v_{ego} < 7 \text{ km/h}$ (Situation „Anfahren“)
- Lenkwinkel $\delta > 45^\circ$ (Abbiegeabsicht)

- Gaspedalstellung $G > 5\%$ (Anfahrabsicht)

Die im Vergleich einfache Erkennung der Abbiegeabsicht ist für die Situation „Anfahren“ im Prototypsystem ausreichend. Da die Anfahrabsicht erst ab einer Gaspedalstellung größer 5% erkannt wird, ist es dem Fahrer möglich, sich in unübersichtlichen Kreuzungen mit geringer Geschwindigkeit in die Kreuzung zu tasten. Da die Sichtbedingungen an einer Kreuzung nicht vorhersagbar sind, ist es nicht sinnvoll, die Möglichkeit des Vorwärtstastens auf einen bestimmten Bereich, beispielsweise die eigene Fahrbahn, zu beschränken. Umgekehrt ist es so möglich, mit geringer Gaspedalstellung auf die Gegenfahrbahn zu fahren, ohne dass das System aktiviert wird. In den durchgeführten Fahrversuchen wurden bei tatsächlichem Anfahren auch bei vorsichtigen Fahrern immer Gaspedalwerte gemessen, die deutlich über 5 % lagen.

Bild 5-12 zeigt ein Aktivitäts-Diagramm des Linksabbiegeassistenten, das einen Überblick über die Funktionsweise einschließlich der Kollisionswahrscheinlichkeit (siehe 5.4) gibt.

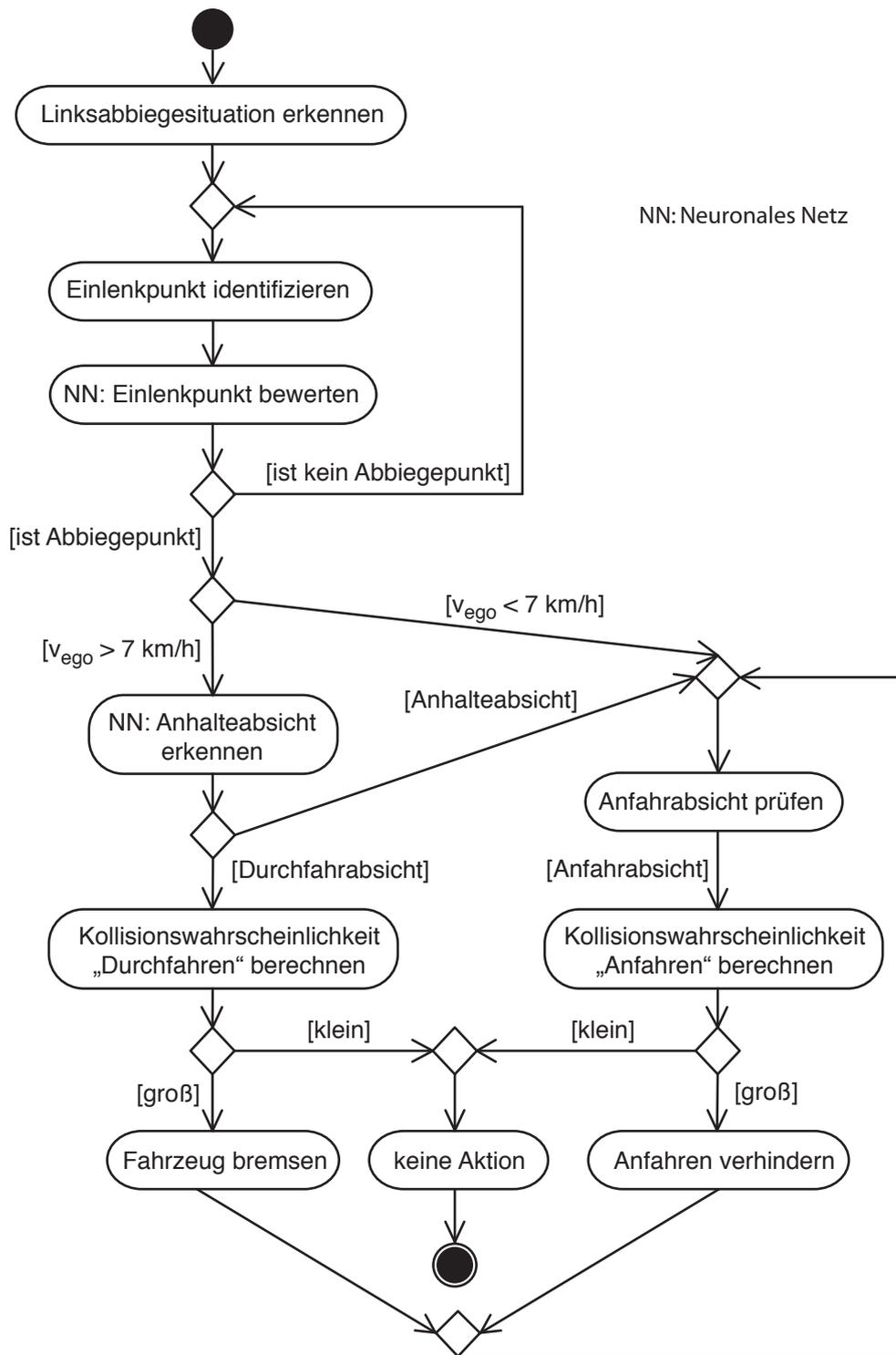


Bild 5-12: UML 2.0 Aktivitäts-Diagramm des Linksabbiegeassistenten

5.3.6 Qualität der Erkennung der Abbiegeabsicht

Die Neuronalen Netze der beiden Schritte der Erkennung der Abbiegeabsicht (1. Schritt: Erkennen des Abbiegepunkts; 2. Schritt: Erkennen der Anhalteabsicht) wurden mit den genannten Kriterien und den aufgezeichneten Versuchsdaten der Fahrversuche trainiert und getestet. Zwei der sieben vermessenen Kreuzungen sind sehr enge Kreuzungen von Nebenstraßen, an deren Zufahrten bis in den Kreuzungsbereich Fahrzeuge am Straßenrand geparkt waren. Deshalb war der benutzbare Bereich der Zufahrten innerhalb der Versuche unterschiedlich, je nachdem wo und wie Fahrzeuge geparkt waren, und eine Zuordnung von eigener und Gegenverkehrs-Fahrspur war nicht durchgehend möglich. Die Daten, die an diesen Kreuzungen aufgezeichnet wurden, wurden deshalb für die Erkennung der Abbiegeabsicht nicht weiter benutzt. Eine weitere Kreuzung unterscheidet sich in der Form deutlich von den übrigen vermessenen Kreuzungen [CORINO 2005, S. 47]. Auch sie wurde für die Erkennung der Abbiegeabsicht nicht weiter benutzt. So standen insgesamt noch 183 Abbiegevorgänge zur Verfügung. Die Kreuzungen, deren Daten nicht benutzt wurden, unterscheiden sich so von den übrigen Kreuzungen, dass sich das Fahrerverhalten grundlegend ändert. Weitere Untersuchungen müssen durchgeführt werden, um diese Kreuzungen zu klassifizieren und das Fahrerverhalten bezüglich der Abbiegeabsicht interpretierbar zu machen.

Die Tests zum Beurteilen der Qualität der Abbiegeerkennung wurden einmal für die beiden Schritte einzeln und einmal für beide gesamt durchgeführt. Die Anzahl der Tests unterscheidet sich für die verschiedenen Schritte. Beim Test des ersten Schritts wurden die Abbiegevorgänge vom Typ „Durchfahren“ und „Anhalten“ getestet. Im zweiten Schritt wurden nur diejenigen Abbiegevorgänge getestet, die im ersten Schritt unmittelbar als solche erkannt wurden, d.h. bei denen der erste Einlenkpunkt ein Abbiegepunkt ist. Beim gesamten Test beider Schritte wurden alle 183 Abbiegevorgänge getestet, auch die beiden „vorher angehalten“ Typen. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Tests der Neuronalen Netze zur Erkennung der Abbiegeabsicht

System	Anzahl Daten	False-Positive	False-Negative	Fehler gesamt	Fehler-Anteil [%]
Fuzzy-Logic-Netz, 1. Schritt	148	5	0	5	3,4
Fuzzy-Logic-Netz, 2. Schritt	128	5	0	5	3,9
Fuzzy-Logic-Netz gesamt	183	5	0	5	2,7
MLP, 1. Schritt	148	4	0	4	2,7
MLP, 2. Schritt	128	1	2	3	2,3
MLP, gesamt	183	1	2	2	1,6

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den vermessenen Kreuzungen eine Erkennung der Abbiegeabsicht mit geringer Fehlerrate möglich ist. Inwieweit die Ergebnisse auf andere Kreuzungstypen (Hauptstraßen, mehrspurige Straßen etc.) übertragbar sind, muss durch vergleichbare Untersuchungen geprüft werden.

5.4 Kollisionswahrscheinlichkeit

Zweiter Teil der Situationsanalyse ist das Erkennen der Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem entgegenkommenden Fahrzeug. Der Systemeingriff wird nur ausgelöst, wenn neben der erkannten Absicht des Fahrers, nicht anzuhalten, auch eine nicht geringe Kollisionswahrscheinlichkeit besteht (siehe Bild 5-12).

5.4.1 Problemstellung

Die Entscheidung über den Systemeingriff fällt am Abbiegepunkt (siehe 5.3.3.3). Zu diesem Zeitpunkt hat der Fahrer immer noch einen großen Spielraum bei der Wahl seiner Abbiegetrajektorie und seines Geschwindigkeitsverhaltens. Die eigene Trajektorie und das eigene Geschwindigkeitsverhalten beim Durchfahren der Konfliktzone sind, neben dem Fahrzustand des Gegenverkehrs, entscheidend für die Wahrscheinlichkeit einer Kollision.

Die fahrdynamisch möglichen Trajektorien zu betrachten, ist für die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit ungeeignet (vgl. 5.3.3.4). Die Berechnung kann nur aufgrund einer Annahme über das zukünftige Fahrerverhalten, d.h. über die zukünftige Trajektorien- und Geschwindigkeitswahl erfolgen. Es wird ein Fahrerverhaltensmodell benötigt, das am Abbiegepunkt Aussagen über Trajektorienwahl und Geschwindigkeitswahl während des ganzen Abbiegevorgangs liefern kann. Das Modell muss über eine ausreichende Präzision verfügen, da knappe Abbiegemanöver, besonders beim Abbiegen hinter einem entgegenkommenden Fahrzeug, häufig sind. Ein ungenaues Modell mit einer entsprechend großen Sicherheitsreserve führt zu vielen False-Positive-Auslösungen.

Die Trajektorien- und Geschwindigkeitswahl beim Linksabbiegen sind Fahraufgaben der zweiten Ebene im 3-Ebenen-Modell des Fahrerverhaltens, der so genannten Bahnführungsebene. In dieser setzt der Fahrer die Kenntnis über die gewünschte Fahrroute und die ihm bekannten aktuellen situativen Gegebenheiten in eine konkrete Solltrajektorie und eine Sollgeschwindigkeit um.

DONGES [1978, S. 100] nennt objektive Gegebenheiten, die im Allgemeinen Solltrajektorie und Sollgeschwindigkeit nicht eindeutig festlegen, sondern einen Bewegungsbereich vorgeben, innerhalb dessen der Fahrer seine subjektive, mentale Solltrajektorie festlegt. Zu den objektiven Gegebenheiten gehören:

- die Fahrbahnbegrenzungen
- die Leistungsfähigkeit des eigenen Fahrzeugs
- entgegenkommende Fahrzeuge
- weitere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger oder Radfahrer (BANJERJEE U.A. [2004 S. 4] zeigen einen Zusammenhang zwischen Fußgängern in der Fußgängerfurt der Zielspur und der Größe der von den Linksabbiegern akzeptierten Lücken im Gegenverkehr)
- parkende Fahrzeuge
- außergewöhnliche Einflüsse wie Baustellen, Einsatzfahrzeuge usw.

Neben den objektiven Gegebenheiten, die der Fahrer unbedingt berücksichtigen muss, gibt es subjektive Einflüsse unterschiedlicher Ausprägung, die die Trajektorien- und Geschwindigkeitswahl des Fahrers innerhalb des von den objektiven Gegebenheiten vorgegebenen Bewegungsbereichs beeinflussen:

- Fahrbahnmarkierungen und Fahrstreifenbegrenzungen
- Einflüsse, die den Fahrer zu einem zusätzlichen Sicherheitsabstand veranlassen können, wie wartende Fußgänger oder Kinder am Fahrbahnrand
- Wetterbedingungen und Fahrbahnbeschaffenheit
- das Komfortbedürfnis von Mitfahrern
- ablenkende Einflüsse wie Telefongespräche
- persönliche Vorlieben
- Zeitnot
- die aktuelle Wartezeit an der Kreuzung (MEYER & DIDIER [2003 S. 64f] zeigen einen Zusammenhang zwischen der Wartezeit an einer Kreuzung und der akzeptierten Lückengröße im Gegenverkehr beim Linksabbiegen)

Fahrbahnmarkierungen werden oft als objektive Gegebenheiten angeführt, die den Bereich beschränken, in dem der Fahrer seine Trajektorie wählt. Die Ergebnisse der Fahrversuche aus 5.3.1 und die praktische Erfahrung zeigen, dass gerade im Kreuzungsbereich und beim Linksabbiegen, Fahrbahnmarkierungen überfahren werden, ohne dass dies als besonders risikoreiches Fahrverhalten zu werten ist. Aus diesem Grund werden sie hier zu den subjektiven Einflüssen gezählt.

Ein Fahrerverhaltensmodell, das die gegebenen Genauigkeitsanforderungen erfüllen soll, muss objektive Gegebenheiten und subjektive Einflüsse auf das Fahrerverhalten berücksichtigen.

Ein weiteres Problem bei der Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit ist die Vielzahl der möglichen Szenarien beim Linksabbiegen (vgl. 5.1.2).

5.4.2 3D-Fahrerverhaltensmodell und 3D-Kollisionsbetrachtung

Bisherige Untersuchungen zum Fahrerverhalten beim Linksabbiegen beziehen sich meist auf die Zeitlücken im Gegenverkehr, die vom abbiegenden Fahrer akzeptiert werden (z.B. HANCOCK ET AL. [1991] oder SCHEUCHENPFUG ET AL. [2004]). Bei dieser Betrachtung wird die Zeitlücke als Maß für die Kollisionsgefahr genutzt. Die Zeitlücke wird z.B. bei SCHEUCHENPFUG ET AL. [2004 S. 24] bis zu einer idealisierten Linksabbiegespur gemessen, d.h. dass das eigene Fahrerverhalten als idealisiert angenommen wird.

Bei einer genaueren Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit ist, neben der Entfernung und dem Fahrzustand des Gegenverkehrs, das eigene Fahrerverhalten für die Kollisionswahrscheinlichkeit entscheidend. Dabei sind die beiden Faktoren des Fahrerverhaltens, Geschwindigkeitswahl und Trajektorienwahl, so verknüpft, dass eine gemeinsame Betrachtung sinnvoll ist.

Zur gemeinsamen Betrachtung werden die Trajektorien der Fahrzeuge (eigenes Fahrzeug und Gegenverkehrsfahrzeuge) in einem dreidimensionalen Raum dargestellt. Die drei Dimensionen

sind x- und y-Dimension, die der Fahrbahnebene entsprechen, und eine t-Dimension, die der Zeit entspricht. Die aus der Unfallrekonstruktion bekannten Betrachtungen von räumlicher und zeitlicher Vermeidbarkeit [UNFALLFORENSIK 2006] werden so zusammengefasst. Die Trajektorien von Fahrzeugpunkten, z.B. dem Fahrzeugschwerpunkt, werden als Linien im dreidimensionalen Raum dargestellt (3D-Trajektorien). Bild 5-13 zeigt eine 3D-Trajektorie eines Abbiegevorgangs an einer Kreuzung in einer axonometrischen Projektion. In Bild 5-14 ist die gleiche Situation in geklappten Ansichten dargestellt. Die Kreuzungsumrisse sind in der xy-Ebene eingezeichnet. In der 3D-Betrachtung entsprechen Schnittpunkte von Trajektorien verschiedener Fahrzeuge Kollisionen.

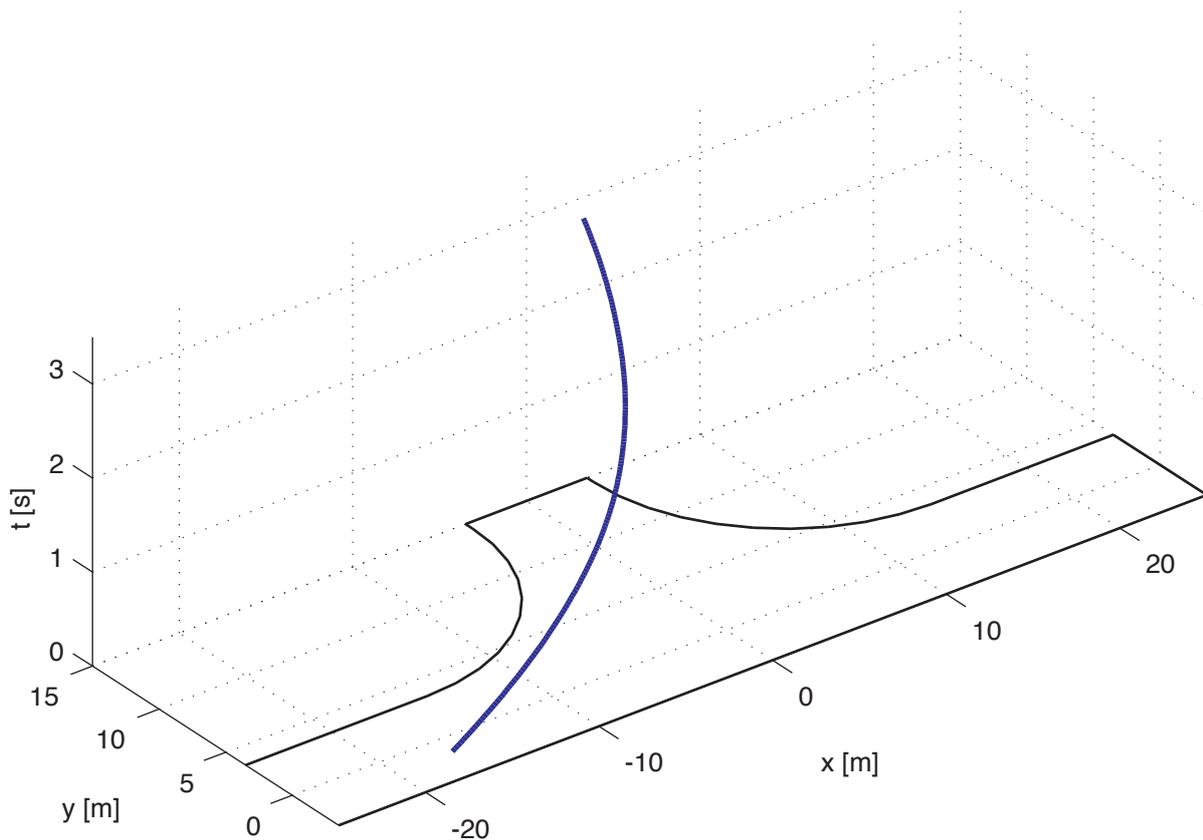


Bild 5-13: Einzelne 3D-Trajektorie eines Abbiegevorgangs an einer Kreuzung (axonometrische Projektion)

Um das rechnerische Erkennen von Kollisionen zu vereinfachen, wird die dreidimensionale Betrachtung diskretisiert. Der 3D-Raum wird in Volumenelemente (Voxel, siehe PRECHT ET AL. [2004, S. 525] und WIKIPEDIA [2006c]) aufgeteilt. Dem betrachteten Raum wird eine dreidimensionale Matrix zugeteilt, deren Elemente jeweils einem Voxel mit den Abmessungen l_{Vx} , l_{Vy} , l_{Vt} zugeordnet sind. Im einfachsten Fall, in dem die Trajektorie eines Punktes betrachtet wird, sind die Elemente der Matrix Binärzahlen. Ein Element ist 1, wenn die Punkt-Trajektorie das zugehörige Raumelement schneidet, ansonsten 0. Eine 1 in einem Matrixelement bedeutet, dass das zugehörige Voxel belegt ist, d.h., dass die Fahrbahnfläche die der x-y-Lage und Ausdehnung (l_{Vx} , l_{Vy}) des Voxel im Zeitraum der t-Lage und Ausdehnung (l_{Vt}) des Voxel belegt ist. Bei einer Kollision belegen die Trajektorien verschiedener Fahrzeuge dasselbe Raumelement. Gibt es für die Trajektorie der beiden Fahrzeuge je eine Matrix, wird die Kollision rechnerisch über die elementweise

Multiplikation der Matrizen der beiden Trajektorien gefunden. Die Genauigkeit der Kollisionsberechnung hängt von der gewählten Auflösung der Diskretisierung ab.

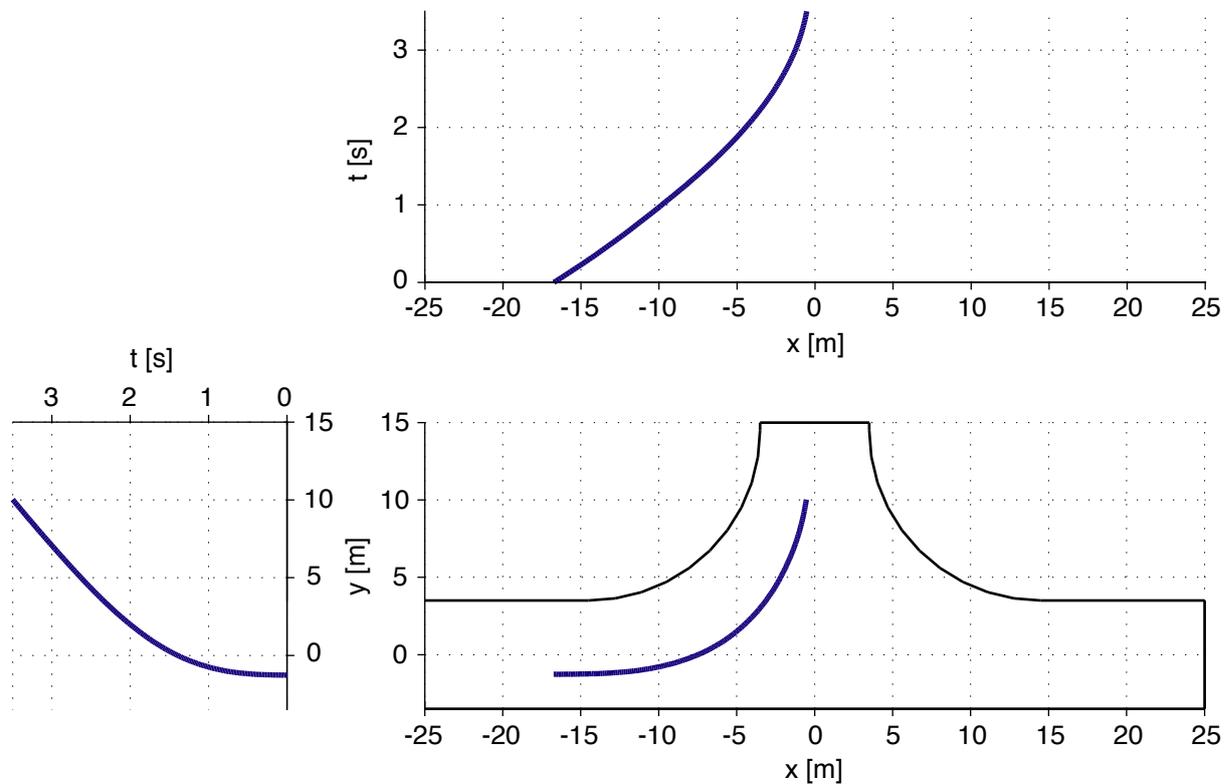


Bild 5-14: Einzelne 3D-Trajektorie eines Abbiegevorgangs an einer Kreuzung (geklappt)

Die diskretisierte Betrachtung erlaubt, die Fahrzeugabmessungen in die Kollisionsberechnung einzubeziehen. Die Kollisionserkennung bleibt dabei gleich, nur die Erzeugung der Matrizen unterscheidet sich. Es werden alle Matrixelemente zu 1 gesetzt, deren zugehörige Voxel von den Fahrzeugumrissen berührt oder eingeschlossen werden. Die Matrix gibt so den Raum-Zeitbedarf des kompletten Fahrzeugs wieder (siehe Bild 5-15).

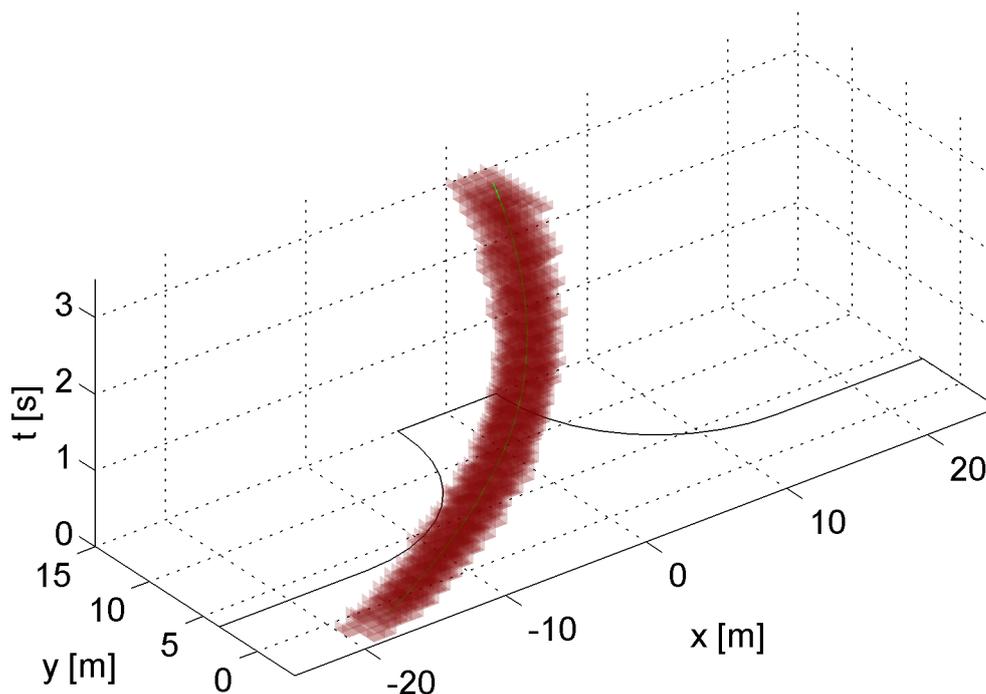


Bild 5-15: 3D-Trajektorie und diskretisierte Darstellung der belegten 3D-Elemente bei Berücksichtigung der Fahrzeugabmessungen

Die Betrachtung einer einzelnen Trajektorie bzw. eines einzelnen Fahrzeugs enthält bisher nur einen konkreten Weg des Fahrzeugs. Am Entscheidungspunkt ist der konkrete Weg des Fahrzeugs noch nicht bekannt (siehe 5.4.1). Daher wird ein Modell für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des eigenen Fahrzeugs und der Gegenverkehrsfahrzeuge benutzt, um eine Kollisionswahrscheinlichkeit zu berechnen. Aufenthaltswahrscheinlichkeiten können in der 3D-Betrachtung dargestellt werden, indem die Elemente der 3D-Matrix mit Realzahlen, beispielsweise zwischen 0 und 1, belegt werden. Die Zahl in einem Matrixelement gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit $p_{ego}(x_i, y_j, t_k)$ das zugehörige Voxel vom Fahrzeug belegt wird. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist der zentrale Bestandteil des 3D-Fahrerverhaltensmodells.

Bild 5-16 zeigt die dreidimensionale Darstellung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung bei einem Abbiegevorgang. Die Wahrscheinlichkeit p_{ego} jedes Matrixelements ist durch die Farbe und die Transparenz des zugehörigen Voxels codiert. Diese Codierung gilt für alle Darstellungen von Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilungen.

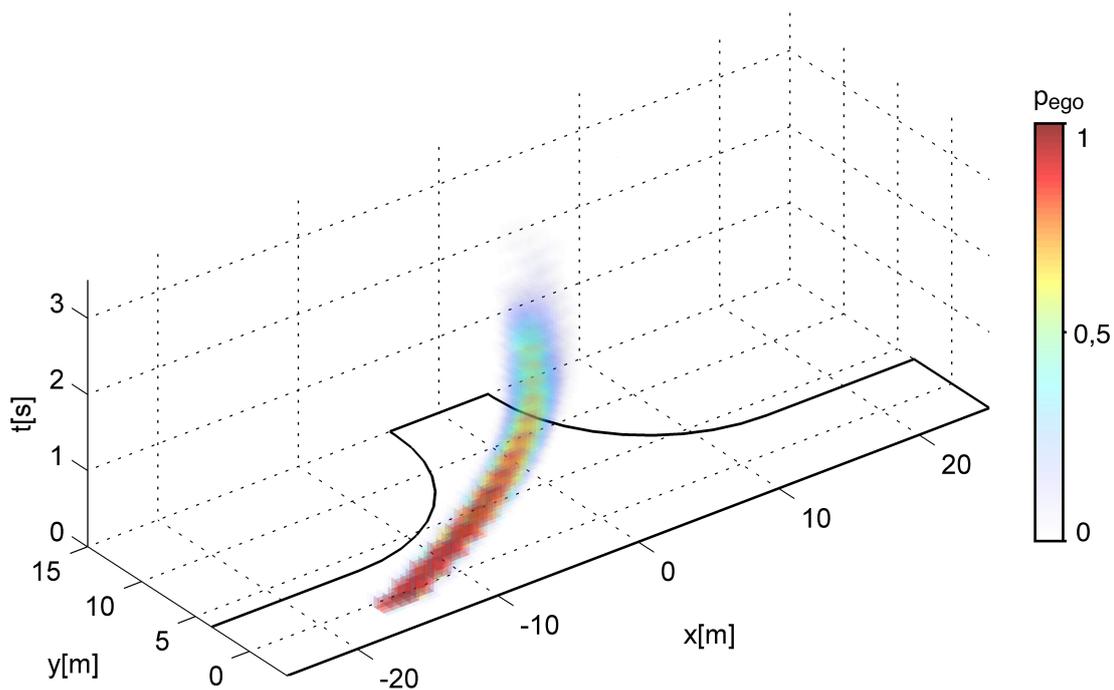


Bild 5-16: 3D-Darstellung eines Abbiegevorgangs mit Aufenthaltswahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit der Kollision zweier Fahrzeuge $p_{koll}(x_i, y_j, t_k)$ in einem bestimmten Voxel (x_i, y_j, t_k) wird berechnet, indem die Werte der zugehörigen Matrixelemente der beiden Fahrzeuge ($p_{ego}(x_i, y_j, t_k)$, $p_{geg}(x_i, y_j, t_k)$) multipliziert werden:

$$p_{koll}(x_i, y_j, t_k) = p_{ego}(x_i, y_j, t_k) \cdot p_{geg}(x_i, y_j, t_k)$$

Die Wahrscheinlichkeit der Kollision in dem Zeitraum der Voxelenebene t_k kann bei Berücksichtigung der Fahrzeugabmessungen nicht mehr exakt berechnet werden, da die Werte der Elemente einer xy-Ebene nicht unabhängig sind, d.h., die Wahrscheinlichkeit einer Kollision innerhalb eines Voxels ist nicht unabhängig von der Wahrscheinlichkeit der Kollision innerhalb eines Nachbarvoxels. Näherungsweise gilt:

$$p_{koll}(t_k) \approx \frac{\left(\sum_{i=1}^{x_{max}} \sum_{j=1}^{y_{max}} p_{ego}(x_i, y_j, t_k) \cdot p_{geg}(x_i, y_j, t_k) \right)}{\left(\sum_{i=1}^{x_{max}} \sum_{j=1}^{y_{max}} p_{ego}(x_i, y_j, t_k) \sum_{i=1}^{x_{max}} \sum_{j=1}^{y_{max}} p_{geg}(x_i, y_j, t_k) \right)}$$

Die oberen Grenzen der Summen, x_{max} und y_{max} , bezeichnen dabei jeweils den größten Index in x- und y-Richtung.

Die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision ist also näherungsweise die Summe der paarweisen Produkte der zusammengehörenden Elemente einer xy-Ebene geteilt durch das Produkt der Summen der Elemente der xy-Ebenen der beiden Matrizen. Die Normierung durch das Produkt der Summen ist notwendig, da die Summe der Elemente einer Ebene größer 1 ist. Dies ist deshalb der Fall, weil ein Fahrzeug bei Berücksichtigung der Fahrzeugabmessungen zu einem festen Zeitpunkt, d.h. in einer xy-Ebene, mehr als ein Element belegt.

Die Kollisionswahrscheinlichkeit für den gesamten betrachteten Zeitraum, also beispielsweise für einen Abbiegevorgang, wird über die Gegenwahrscheinlichkeiten zu den Kollisionswahrscheinlichkeiten der einzelnen Zeiträume berechnet. Auch in diesem Fall ist die Berechnung nur eine Näherung, da die Kollisionswahrscheinlichkeiten in aufeinander folgenden Zeiträumen nicht unabhängig sind:

$$p_{koll} \approx 1 - \prod_{k=1}^{t_{max}} (1 - p_{koll}(t_k))$$

Dabei ist $(1 - p_{koll}(t_k))$ die Wahrscheinlichkeit, dass im Zeitraum $t = t_k$ keine Kollision erfolgt. Die Genauigkeit der Berechnung der Wahrscheinlichkeit p_{koll} ist ausreichend, um auf ihrer Basis einen Entscheidungsalgorithmus für den Systemeingriff aufbauen zu können.

Bild 5-17 zeigt die Trajektorien eines abbiegenden und eines entgegenkommenden Fahrzeugs, die dieselben Voxel belegen, bei denen also eine Kollisionswahrscheinlichkeit besteht. Die Fahrzeugabmessungen sind bei der Belegung der Voxel berücksichtigt.

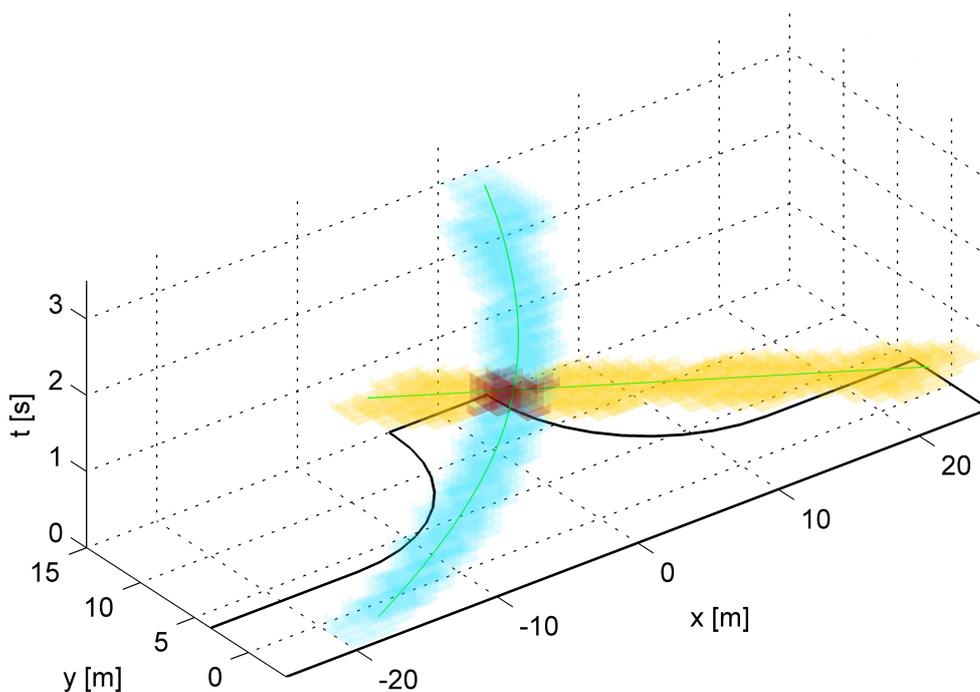


Bild 5-17: Belegung derselben Raumelemente (rot) durch Abbieger (blau) und Gegenverkehr (gelb)

5.4.3 Erzeugen und Anpassen des Modells

Ein ideales Modell für die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit liefert am Entscheidungspunkt die subjektiv mentale Solltrajektorie des Fahrers (siehe 5.4.1). Da nicht alle Einflüsse auf den Fahrer erfasst werden können, beruht das Fahrerverhaltensmodell auf einer Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung (siehe 5.4.2). Um das Modell an unterschiedliche Kreuzungen anpassen zu können, wird ein Verfahren benötigt, das die Belegtwahrscheinlichkeiten der Voxel entspre-

chend der verfügbaren objektiven Gegebenheiten (siehe 5.4.1) anpasst. Die wichtigste objektive Gegebenheit sind dabei die Fahrbahnbegrenzungen. Das Anpassen des Modells kann als Verzerren der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung entsprechend der Fahrbahnbegrenzungen der aktuellen Kreuzung interpretiert werden. Ein Verfahren, mit dem ein solches Verzerren anhand geometrischer Gegebenheiten möglich ist, ist das Field Morphing.

5.4.3.1 Field Morphing

Aus der Computergrafik sind Algorithmen bekannt, die erlauben, fließende Übergänge zwischen zwei Bildern durch so genanntes „Image Morphing“ zu erstellen. Sie werden hauptsächlich in der Filmindustrie zum rechnergestützten Erzeugen von Spezialeffekten genutzt. Typisch für den Morphing-Prozess ist die schrittweise Verzerrung von Start- und Zielbild um die Konturen der Bilder zur Übereinstimmung zu bringen [SCHLICKLING 2002, S. 2]. Um einen optisch gleichmäßigen Übergang der Bilder zu erreichen, wird die Verzerrung anhand von Orientierungsmerkmalen berechnet. Die Orientierungsmerkmale werden im Start- und Zielbild manuell festgelegt. Jeweils ein Merkmal in Start- und Zielbild, die sich an semantisch identischen Stellen befinden, werden einander zugeordnet. Das Verschieben der einzelnen Bildpunkte in den Zwischenbildern erfolgt anhand der stufenweisen Anpassung der Merkmale vom Start- zum Zielbild. Im einfachen „Field-Morphing-Verfahren“, das 1992 von [BEIER, NEELY] zum ersten Mal vorgestellt wurde, dienen gerichtete gerade Linien als Orientierungsmerkmale. Die Lage der Orientierungslinien wird für jedes Zwischenbild aus der Position der Linien in Start- und Zielbild interpoliert. Die Lage jedes Pixels des Zwischenbildes wird anhand der Lage der Orientierungslinien im Startbild und im Zielbild gesucht. Da das Pixel im Start- und Zielbild im Allgemeinen nicht auf Koordinatenwerten des natürlichen Zahlenraums liegt, also nicht genau ein Pixel des Start- bzw. Zielbilds trifft, werden die Farbwerte des Pixels des Zwischenbildes aus den umliegenden Pixeln des Quellbildes interpoliert. Die Suche der Lage der Pixel eines Zwischenbildes im Quellbild wird Backward-Mapping genannt. Sie garantiert, dass jeder Pixel des Zwischenbildes genau einmal gesetzt wird. Beim Forward-Mapping, bei dem die Lage der Pixel des Quellbildes im Zwischenbild bestimmt wird, können einzelne Pixel mehrfach gesetzt werden oder leer bleiben. Im Folgenden wird das Forward-Mapping beschrieben, bei Backward-Mapping sind Quell- und Zwischenbild zu vertauschen.

Ist im Quell- und Zielbild jeweils nur eine Orientierungslinie vorhanden, wird ein Punkt X_Q in ein Zwischenbild transformiert, indem im Quellbild ein Lot vom Punkt auf die Linie gefällt wird. Nun wird der Punkt X_Z gesucht, der denselben Abstand v von der Orientierungslinie im Zwischenbild hat und dessen Lot die Orientierungslinie im selben Verhältnis u teilt, wie der Quellpunkt im Quellbild (siehe Bild 5-18). Die Orientierungslinien sind gegeben durch einen Startpunkt (P_Q im Quellbild und P_Z im Zwischenbild) und einen Vektor S_Q und $S_Z \neq 0$. Das Teilungsverhältnis u wird berechnet mit:

$$u = \frac{(X_Q - P_Q) \cdot S_Q}{|S_Q|^2}$$

Ist $0 < u \leq 1$, teilt das Lot die Orientierungslinie, für $u < 0$ liegt das Lot unterhalb der Orientierungslinie, für $u > 1$ oberhalb. Die Länge des Lotes vom Punkt auf die Orientierungslinie im Quellbild ist

$$v = \frac{(X_Q - P_Q) \cdot \text{Senkrechte}(S_Q)}{|S_Q|}$$

wobei $\text{Senkrechte}(S)$ einen Vektor bezeichnet, der genau so lang ist wie S , aber um 90° rotiert ist. Der Punkt X_Z wird berechnet mit

$$X_Z = P_Z + u \cdot S_Z + \frac{v \cdot \text{Senkrechte}(S_Z)}{|S_Z|}$$

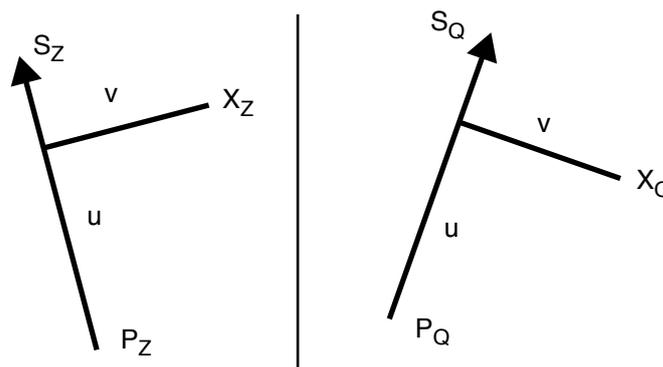


Bild 5-18: Linie im Zwischenbild (links) und im Quellbild (rechts)

Mit jeweils einer Orientierungslinie im Quell- und Zwischenbild können folgende Transformationen und Mischformen aus ihnen erzeugt werden:

- Für $S_Q = S_Z$ und $P_Q = P_Z$ sind Quellbild und Zwischenbild identisch.
- Für $S_Q = S_Z$ und $P_Q \neq P_Z$ ist das Zwischenbild eine Verschiebung des Quellbildes.
- Für $S_Q = \lambda S_Z$ und $P_Q = P_Z$ unterscheiden sich Quell- und Zwischenbild durch eine Skalierung um λ . Für $\lambda < 0$ wird das Zwischenbild um 180° gedreht.
- Für $S_Q \neq S_Z$ und $P_Q = P_Z$ unterscheiden sich Quell und Zwischenbild durch eine Rotation.

Für komplexere Morphs sind mehrere Referenzlinienpaare nötig. Für jedes Linienpaar wird mit dem jeweiligen Teilungsverhältnis und der Lotlänge u_i und v_i ein Punkt X_{Z_i} im Zwischenbild gefunden. Die Verschiebung $D_i = X_{Z_i} - X_Q$ wird berechnet und ein gewichtetes Mittel aller Verschiebungen ergibt die endgültige Verschiebung von X_Q zum Punkt im Zwischenbild X_Z . Das

Gewicht ω_i , mit dem eine einzelne Verschiebung in die Gesamtverschiebung eingeht, berechnet sich aus Länge der jeweiligen Linie $|S_{Q_i}|$ und dem Abstand d_{X_i} des Punktes X_Q von der Linie:

$$\omega_i = \left(\frac{|S_{Q_i}|^p}{a + d_{X_i}} \right)^b$$

Durch Einstellen der Parameter $a > 0$ und $b, p \geq 0$ kann die Charakteristik des Morphings verändert werden. Wird a nur wenig größer als 0 gewählt, werden nahe an einer Linie liegende Punkte sehr stark von ihr beeinflusst. Für $b = 0$ haben alle Linien den gleichen Einfluss, wird b groß gewählt, werden nur Punkte nahe einer Linie von ihr beeinflusst. Je größer p , desto stärker wirkt sich die Länge der Linien auf das Gewicht aus. Für $p = 0$ spielt die Länge keine Rolle.

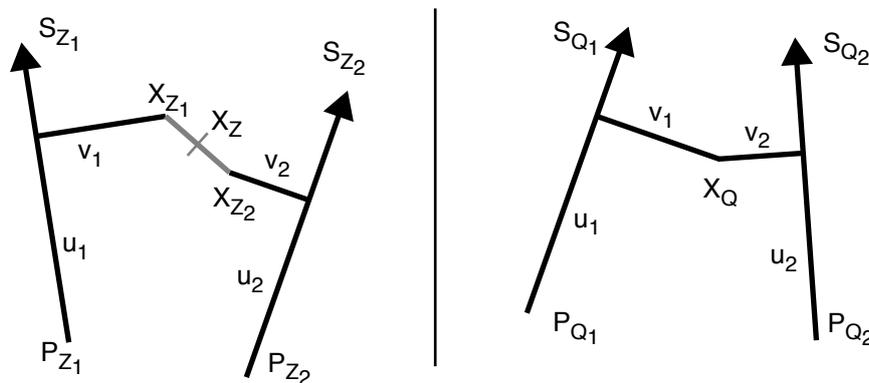


Bild 5-19: Mehrere Linien im Zwischenbild (links) und im Quellbild (rechts)

Für den Abstand d_{X_i} gilt:

- für $0 \leq u_i \leq 1$ ist $d_{x_i} = |v|$
- für $u_i < 0$ ist $d_{x_i} = |P_{Q_i} - X_Q|$
- für $u_i > 0$ ist $d_{x_i} = |P_{Q_i} + S_{Q_i} - X_Q|$

Die Rechenzeit, die ein Field-Morphing-Algorithmus benötigt, steigt linear mit der Anzahl der gemorphten Punkte (normalerweise Bildpunkte) und der Anzahl der Linien.



Bild 5-20: Field-Morphing von 2 Bildern mit 10 Zwischenbildern

5.4.3.2 Anwendung von Field Morphing auf das Fahrerverhaltensmodell

Um die Genauigkeit der Abschätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit zu erhöhen, muss das benutzte Fahrerverhaltensmodell die Gegebenheiten der aktuellen Situation berücksichtigen (vgl. 5.4.1).

Die wichtigste objektive Gegebenheit, die das Fahrerverhalten beeinflusst, sind die Straßenbegrenzungen. Das Fahrerverhaltensmodell aus 5.4.2 wird an die aktuellen Straßenbegrenzungen durch einen Algorithmus angepasst, der auf dem Field-Morphing-Algorithmus basiert.

Die Orientierungslinien, die für einen Field-Morphing-Algorithmus nötig sind, werden anhand der Straßenränder festgelegt. Während bei der Anwendung von Field-Morphing-Algorithmen in der Computergrafik die Orientierungslinien vom Animator festgelegt werden, müssen bei der Anpassung der Fahrerverhaltensmodells die Orientierungslinien automatisiert aus den vorhandenen Daten der aktuellen Umgebung abgeleitet werden. Durch das Field-Morphing werden die 3D-Trajektorien bzw. die 3D-Matrix, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit enthält, verzerrt. Die Orientierungslinien sind so festzulegen, dass die Verzerrung der Trajektorien möglichst genau der tatsächlichen Änderung des Fahrerverhaltens entspricht.

Das Fahrerverhaltensmodell liegt im Fahrzeug bzw. im Fahrsimulator in Form eines Referenzmodells vor, das für eine Referenzkreuzung gültig ist. Das Referenzmodell wird durch ein Morphing-Verfahren online an die Gegebenheiten der aktuellen Kreuzung angepasst. Auf diese Weise entsteht ein der aktuellen Kreuzung angepasstes Fahrerverhaltensmodell (siehe Bild 5-21).

Das Referenzmodell wird aus den Daten von Fahrversuchen erzeugt. Dabei können Daten aus verschiedenen Ausgangskreuzungen durch das Morphing-Verfahren in die Referenzkreuzung abgebildet und zum Referenzmodell vereint werden.

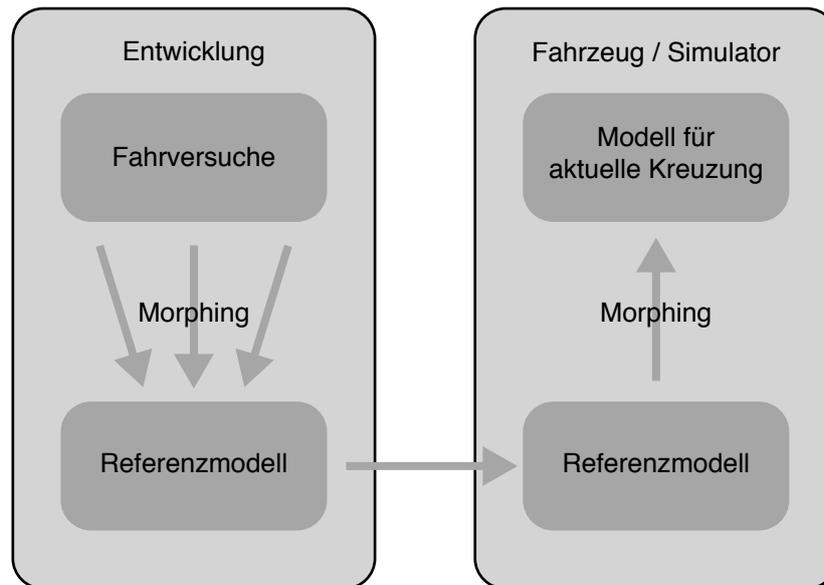


Bild 5-21: Vorgehensweise bei der Erzeugung und Anpassung des Fahrerverhaltensmodells

5.4.3.3 Erzeugen des Modells

Die Kollisionswahrscheinlichkeit beim Abbiegevorgang kann mit Hilfe des Fahrerverhaltensmodells aus 5.4.2 abgeschätzt werden, das auf der Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit für das eigene Fahrzeug beruht. Die Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit ist der zentrale Bestandteil des Fahrerverhaltensmodells.

Die Verteilung wird auf empirischem Weg durch Fahrversuche erzeugt, die repräsentativ für das zu erwartende Fahrerverhalten sind. Dazu werden die Trajektorien von Kreuzungsdurchfahrten von mehreren Versuchspersonen exakt vermessen. Die Versuche werden an mehreren unterschiedlichen Kreuzungen durchgeführt, um unterschiedliche Besonderheiten, die Einfluss auf das Fahrerverhalten haben, aufzunehmen. Für diese Arbeit wurden die Daten der Fahrversuche aus 5.3.1 benutzt. Alternativ zur direkten Vermessung mit Versuchspersonen können die Fahrdaten auch durch die Überwachung einer oder mehrerer Kreuzungen mit einer für diesen Zweck installierten Sensorik gesammelt werden. Eine solche Datensammlung wurde von SHLADOVER ET. AL. [2004, S. 3] durchgeführt. Die Umriss jeder Kreuzung werden exakt vermessen, so dass Orientierungslinien für das Field-Morphing-Verfahren abgeleitet werden können. Die Orientierungslinien werden für alle Kreuzungen auf gleiche Art festgelegt.

Jede einzelne Trajektorie wird nach der Festlegung der Orientierungslinien mit dem Field-Morphing-Verfahren in eine Referenzkreuzung abgebildet, in der ebenfalls die Orientierungslinien auf gleiche Art festgelegt wurden. Bei der Abbildung der Trajektorie werden nicht wie in der Computergrafik Pixelkoordinaten abgebildet, sondern die Koordinaten der einzelnen Messpunkte der Trajektorie. Dabei wird Forward-Mapping angewendet (siehe 5.4.3.1). Es werden nur die x- und y-Werte der 3D-Trajektorie gemorphet, die t-Werte bleiben gleich. In der Referenzkreuzung ergibt sich wieder eine Trajektorie. So werden die an verschiedenen Kreuzungen gefahrenen Trajektorien auf eine gemeinsame Basis, die Referenzkreuzung, gebracht.

Die Orientierungslinien werden allgemein möglichst so festgelegt, dass die Verzerrung der Trajektorien durch das Morphing der tatsächlichen Änderung des Fahrerhaltens durch die veränderten Gegebenheiten entspricht (vgl. 5.4.3.2). Gelingt dies, werden die Trajektorien aus Versuchen in verschiedenen Kreuzungen beim Morphen in die Referenzkreuzung annähernd übereinander abgebildet. Auf diese Weise kann bereits beim Erzeugen des Fahrerhaltensmodells auf seine Qualität geschlossen werden.

Die Orientierungslinien für das Prototypsystem wurden empirisch anhand der Daten der Versuche aus 5.3.1 festgelegt, wobei die Trajektorien aus verschiedenen Kreuzungen ausreichend übereinander zu liegen kommen.

Folgende Orientierungslinien für die Kreuzungen wurden im Prototypsystem festgelegt (vgl. Bild 5-22):

- 1: Übergang der Bögen der Straßenränder zu einer geraden Straße bzw. Unterschreiten einer Grenzkrümmung in der Zielzufahrt der Kreuzung
- 2: Mittelpunkt der Bögen der Straßenränder
- 3: Mittellinie der Straße von -25 m bis 0 m x-Koordinate
- 4 und 5: Verbindungslinien von drei Punkten am rechten Straßenrand bei -25 m, 0 m und +25 m x-Koordinate

Eine weitere Orientierungslinie 6 wird benutzt, um den Startpunkt in die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit einfließen zu lassen. In der Ausgangskreuzung wird die Linie 6 für jede Trajektorie einzeln festgelegt, wobei der untere Punkt der Linie auf den Startpunkt gelegt wird. Der Startpunkt ist der Stillstandspunkt des Fahrzeugs in der Situation „Anfahren“ und der Punkt in der Situation „Durchfahren“, an dem die Trajektorie in den Voxel-Raum eindringt.

In der Referenzkreuzung erhalten die Startpunkte feste Koordinaten: -17 m/-1,75 m (in der Situation „Durchfahren“) und -12 m/-1,75 m (im der Situation „Anfahren“). Der zweite Punkt der Linie 6 ist in allen Fällen Punkt am rechten Straßenrand mit der x-Koordinate 0. Durch das Morphing zu der festen Linie in der Referenzkreuzung werden die unterschiedlichen Startpunkte verschiedener Trajektorien zu einem gemeinsamen Punkt in der Referenzkreuzung zusammengeführt. Wird zur Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit das Modell an die aktuelle Kreuzung angepasst, kann der aktuelle Startpunkt mit in die Berechnung einbezogen, und damit die Genauigkeit der Berechnung erhöht werden (vgl. 5.4.3.4). In Bild 5-22 sind beide Linien 6 für die unterschiedlichen Startpunkte in den Situationen „Anfahren“ und „Durchfahren“ eingezeichnet.

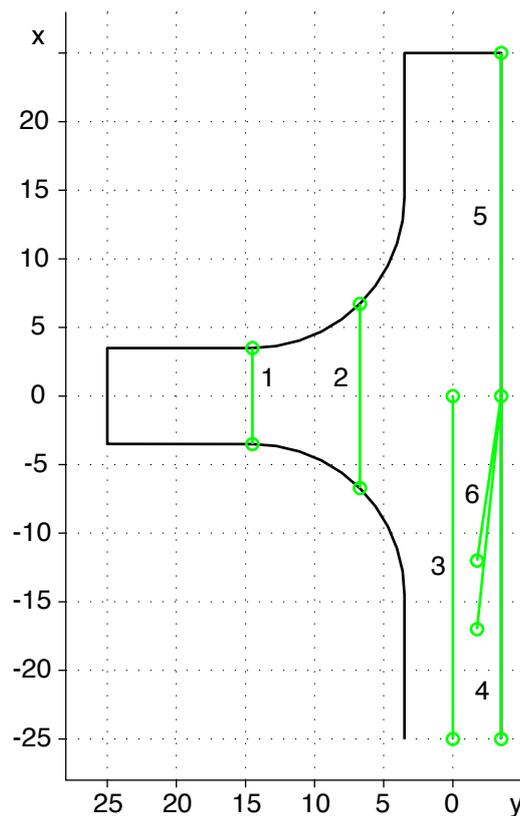


Bild 5-22: Referenzkreuzung: Straßenränder und Orientierungslinien für das Morphing

Zum Erzeugen der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung wird für die Referenzkreuzung eine Matrix bestimmt, deren Elemente Voxeln zugeordnet sind (vgl. 5.4.2). Für jede einzelne gemorphte Trajektorie wird bestimmt, welche Voxel von den Fahrzeugumrissen berührt oder eingeschlossen werden, die Werte der entsprechenden Matrix-Elemente werden erhöht. Jedes Matrixelement wird durch die Anzahl der gemorphten Trajektorien dividiert. Der Wert jedes Elements entspricht damit der Wahrscheinlichkeit, dass das zugehörige xyt -Voxel belegt ist. Im Prototypsystem decken die Voxel einen Bereich der Kreuzung ab, der in x -Richtung eine Ausdehnung von -17 m bis zum maximal in den Trajektorien vorhandenen x -Wert, in y -Richtung vom minimalen y -Wert in allen Trajektorien bis zu $+10$ m hat.

Diese Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung in der Matrix wird als Parametersatz gespeichert (siehe Bild 5-21).

Das Zusammenführen der Trajektorien aus unterschiedlichen Kreuzungen in eine Referenzkreuzung durch ein Morphing-Verfahren mit Orientierungslinien, die aus den Straßenrändern abgeleitet werden, ist möglich, solange die Kreuzungen so beschaffen sind, dass die Straßenränder den größten Einfluss auf das Fahrerverhalten haben. Bei Kreuzungen, deren Form oder Größe deutlich von der Referenzkreuzung abweicht, können andere Gegebenheiten oder Einflüsse größere Auswirkungen auf das Fahrerverhalten haben, so dass ein Zusammenführen zu einer Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung nicht möglich ist. Bei engen Kreuzungen mit einem Abbiegewinkel deutlich über 90° beeinflusst beispielsweise der maximale Lenkeinschlag oder der minimale Wendekreis des Fahrzeugs das Fahrerverhalten, der Fahrer holt aus. In diesem Fall werden unterschiedliche Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilungen erstellt, die jeweils für eine bestimmte

Situation gültig sind. Im Prototypsystem werden die Situationen „Anfahren“ und „Durchfahren“ mit unterschiedlichen Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilungen abgedeckt. Bild 5-23 zeigt die beiden Verteilungen der Aufenthaltswahrscheinlichkeit für die Situationen „Anfahren“ und „Durchfahren“.

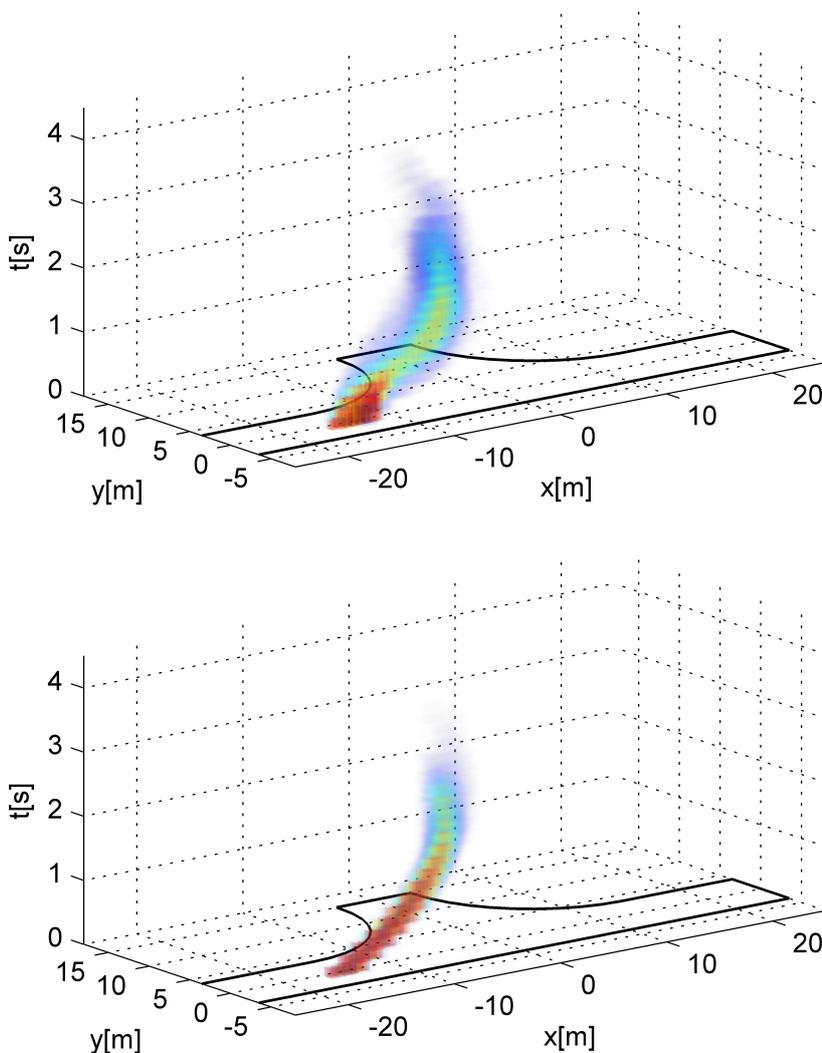


Bild 5-23: Referenzmodell: Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für die Situationen „Anfahren“ (oben) und „Durchfahren“ (unten)

5.4.3.4 Anpassen an die aktuelle Kreuzung

Im Fahrzeug oder Fahrsimulator wird das Referenzmodell in Form von 3D-Matrizen hinterlegt, die eine Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für eine bestimmte Situation darstellen. Bei einer aktuellen Annäherung an eine Kreuzung wird zunächst die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für die aktuelle Situation ausgewählt, z.B. für den Kreuzungstyp und die Situation „Anfahren“ oder „Durchfahren“.

Das Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit kann erfolgen, wie in 5.4.2 dargestellt. Dazu wird die Verteilung der zukünftigen Aufenthaltswahrscheinlichkeit für das eigene Fahrzeug und

das Gegenverkehrsfahrzeug in der aktuellen Situation benötigt. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des eigenen Fahrzeugs wird erzeugt, indem die zur Situation (z.B. Anfahren oder Durchfahren) passende Verteilung aus dem Referenzmodell an die aktuelle Kreuzung angepasst wird. Dazu werden aus den Straßenrändern der aktuellen Kreuzung Orientierungslinien nach demselben Verfahren wie beim Erzeugen des Modells abgeleitet. Der aktuelle Standpunkt des Fahrzeugs in der Situation „Anfahren“ und der erwartete Eintrittspunkt in den Voxel-Raum in der Situation „Durchfahren“ wird im Prototypsystem durch eine variable Orientierungslinie berücksichtigt (entspricht der Linie 6 in Bild 5-22).

Mit den erzeugten Orientierungslinien wird die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Referenzmodells aus der Referenzkreuzung in die aktuelle Kreuzung gemorpht. Dabei kommt die Methode des Backward-Mapping zum Einsatz, so dass jedes Element der Matrix der aktuellen Kreuzung genau ein Mal belegt wird. Das Ergebnis ist eine Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Ego-Fahrzeugs für die aktuelle Kreuzung und Situation.

5.4.4 Erzeugen des Gegenverkehrsmodells

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Gegenverkehrs wird durch ein Modell erzeugt, das den Fahrzustand des Gegenverkehrs in die Zukunft extrapoliert. Ein einfaches Modell kann die aktuelle Position der Gegenverkehrsfahrzeuge mit ihren Geschwindigkeiten extrapolieren. In einer 3D-Darstellung ergibt die so vorausberechnete Trajektorie eines Gegenverkehrsfahrzeugs eine Halbgerade, weswegen das Modell als „lineares Modell“ bezeichnet wird. Ein lineares Modell wird in Bild 5-17 für das entgegenkommende Fahrzeug benutzt. Wird die aktuelle Beschleunigung der Gegenverkehrsfahrzeuge im Modell berücksichtigt, ergibt die 3D-Darstellung der Trajektorie ein Parabelstück, das Modell wird als „quadratisches Modell“ bezeichnet. Das Gegenverkehrsmodell kann auch analog dem eigenen Fahrzeugmodell aus einer Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung aufgebaut werden, die z.B. aus Messungen oder Versuchen erzeugt wird. So kann neben dem aktuellen Fahrzustand des Gegenverkehrs auch normales Fahrerverhalten berücksichtigt werden. Weiterhin kann das Modell optimiert werden, indem die Einflüsse mehrerer Gegenverkehrsfahrzeuge aufeinander berücksichtigt werden. Die 3D-Trajektorie wird mit dem in 5.4.2 beschriebenen Verfahren diskretisiert, wobei die Voxel identisch mit denen der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Ego-Fahrzeugs sind. Beim linearen und quadratischen Modell können Unsicherheiten im Gegenverkehrsmodell berücksichtigt werden, indem nicht eine feste Trajektorie für den Gegenverkehr angenommen wird, sondern eine Verteilung. Eine Gauß-Verteilung wird nach einer erfolgten Diskretisierung durch Anwenden eines Gauß'schen Weichzeichnungsalgorithmus auf die 3D-Matrix erreicht [JÄHNE 1993, S. 96].

Für die Umsetzung und Tests im Fahrsimulator wurde ein lineares Gegenverkehrsmodell benutzt. Die entgegenkommenden Fahrzeuge im Simulator werden von einem automatischen Fahrermodell gesteuert, dessen Verhalten mit einem linearen Gegenverkehrsmodell gut vorhersagbar ist.

5.4.5 Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit

Aus den Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilungen des Ego-Fahrzeugs und der Gegenverkehrsfahrzeuge wird die Kollisionswahrscheinlichkeit wie in 5.4.2 dargestellt berechnet.

Die Schritte zur Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit sind hier noch einmal zusammengefasst:

- Auswahl der passenden Referenz-Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für die aktuelle Kreuzung und Situation
- Ableiten der Orientierungslinien für das Morphing der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Ego-Fahrzeugs aus den Straßenrändern der aktuellen Kreuzung und des aktuellen Startpunkts
- Morphing der Referenz-Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung zur aktuellen Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für das Ego-Fahrzeug
- Erzeugen der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Gegenverkehrs aus dem Gegenverkehrsmodell (z.B. durch Diskretisieren einer Trajektorie und Anwenden eines Gauß'schen Filters)
- Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit durch Verrechnen der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilungen von Ego-Fahrzeug und Gegenverkehr

Die Berechnungsschritte müssen bis auf den Ersten alle in Echtzeit durchgeführt werden, da das Einbeziehen des Startpunkts es erfordert, auch die eigene Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung ständig neu zu berechnen. Dies und das Erzeugen des Gegenverkehrsmodells erfordert hohen Rechenaufwand, da die Laufzeit der zugehörigen Algorithmen proportional mit der Anzahl der Elemente der 3D-Matrix steigt. In der Prototyp-Umsetzung wird eine Matrixgröße von $30 \cdot 30 \cdot 30 = 27000$ Elementen benutzt.

Eine alternative Berechnungsmethode verkürzt die Laufzeit der Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung. Bei dieser Methode wird die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Ego-Fahrzeugs nicht in die aktuelle Kreuzung gemorpht, sondern die Gegenverkehrstrajektorie des Gegenverkehrsmodells wird aus der aktuellen Kreuzung in die Referenzumgebung abgebildet. Die Gegenverkehrstrajektorie erscheint bei einer Darstellung in der Referenzkreuzung nicht mehr als Gerade, sondern durch das Morphen verzerrt (siehe Bild 5-24). Für das Morphen der Gegenverkehrstrajektorie wird ihr Schnittpunkt mit jeder t-Ebene des Voxel-Raumes berechnet. Diese Stützpunkte werden durch Morphing mit Forward-Mapping in die Referenzumgebung abgebildet.

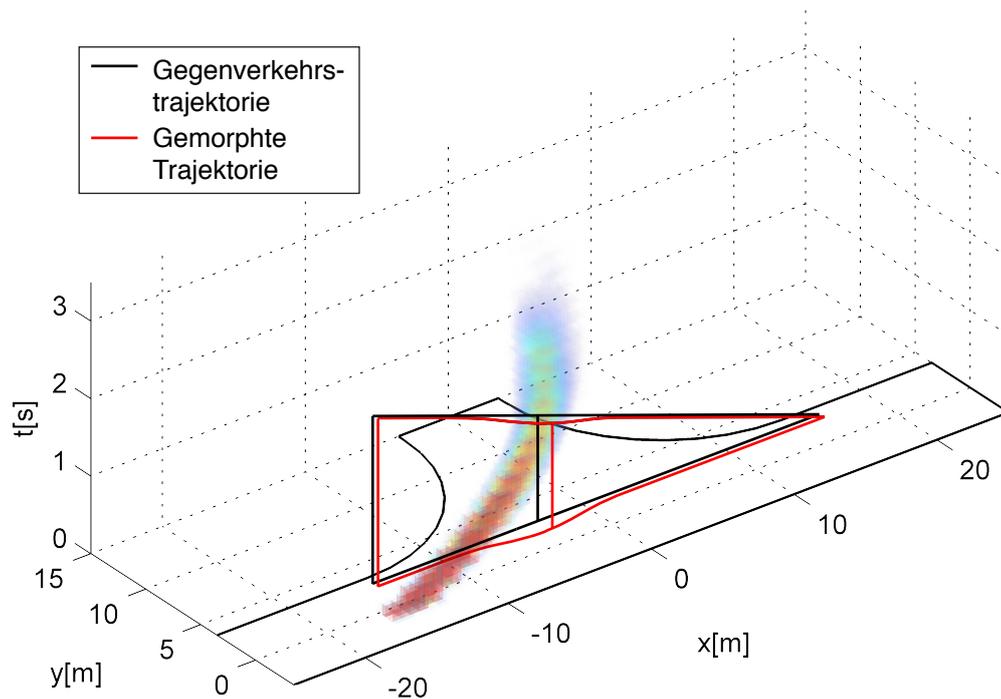


Bild 5-24: Alternative Berechnungsmethode der Kollisionswahrscheinlichkeit: Morphen der Gegenverkehrstrajektorie (schwarz) in die Referenzkreuzung

Die Belegt-Wahrscheinlichkeiten der Voxel der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Ego-Fahrzeugs in der Umgebung jedes Stützpunktes der Gegenverkehrstrajektorie werden durch eine Gauß-Verteilung gewichtet und anschließend addiert. Die Summe entspricht der Kollisionswahrscheinlichkeit im Zeitraum der Voxelenebene $p_{koll}(t_k)$. Bild 5-25 zeigt schematisch die Abfrage der Voxel in der Umgebung eines Stützpunktes.

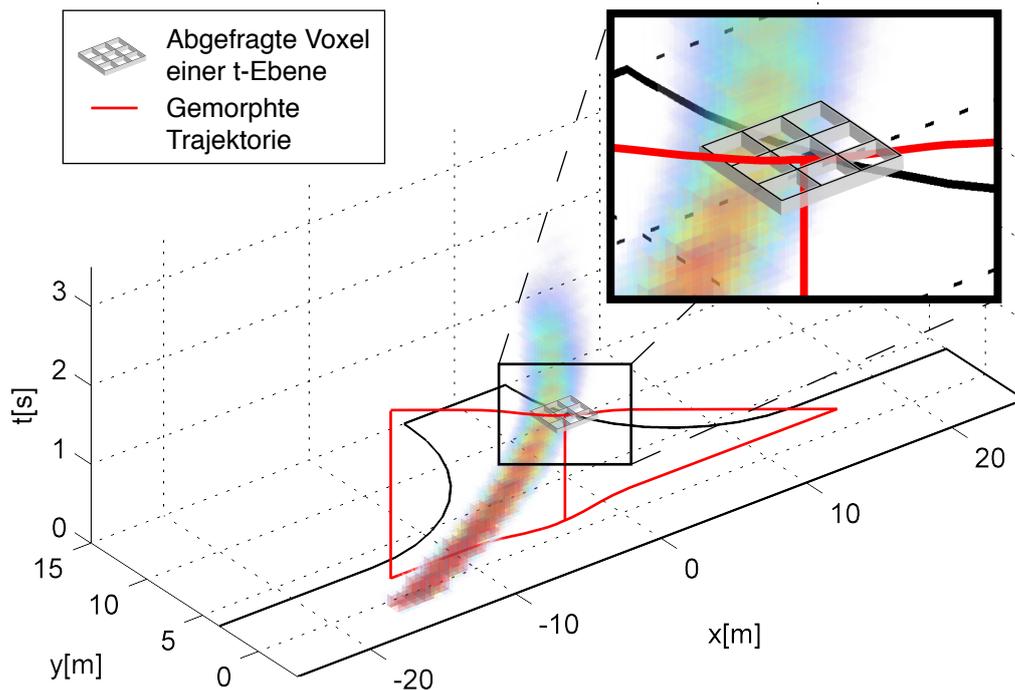


Bild 5-25: Abfrage der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Ego-Fahrzeugs in der Umgebung eines Stützpunkts der Gegenverkehrstrajektorie

Die weitere Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit erfolgt analog zum Verfahren in 5.4.2. Die einzelnen Berechnungsschritte gliedern sich wie folgt:

- Auswahl der passenden Referenz-Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für die aktuelle Kreuzung und Situation
- Ableiten der Orientierungslinien für das Morphing der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Ego-Fahrzeugs aus den Straßenrändern der aktuellen Kreuzung und des aktuellen Startpunkts
- Erzeugen einer Gegenverkehrstrajektorie mit dem Gegenverkehrsmodell
- Morphing der Stützpunkte der Gegenverkehrstrajektorie in die Referenzumgebung mittels Forward-Mapping
- Addition der Belegt-Wahrscheinlichkeiten der umgebenden Voxel der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung des Ego-Fahrzeugs
- Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit aus den Kollisionswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Zeitpunkte

Die alternative Berechnungsmethode spart Laufzeit beim Morphing, da nicht alle Elemente einer 3D-Matrix gemorphet werden, sondern nur ein Stützpunkt pro Matrixebene. Die Gauß-Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Gegenverkehrs wird ebenso nur für die Stützpunkte berechnet und nicht für jedes Element der 3D-Matrix.

5.4.6 Weitere Modelloptimierung

Die Vorgehensweise der Modellerstellung in 5.4.3 muss nicht eine Referenzkreuzung zum Ziel haben, sie kann allgemein in jede Zwischenform erfolgen, aus der sich die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für die aktuelle Kreuzung in x, y und t-Dimension berechnen lässt. Die Abbildung dient dazu, unterschiedliche Gegebenheiten und Einflüsse auf den Fahrer zu berücksichtigen. Dies gilt sowohl bei der Abbildung der Versuchsfahrten in die Zwischenform bei der Modellerstellung als auch bei der Abbildung der Zwischenform in eine Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für die aktuelle Situation. Entscheidend ist, dass die Gegebenheiten und Einflüsse, die in der Abbildung berücksichtigt werden, in der aktuellen Situation zum Entscheidungszeitpunkt verfügbar sind.

Eine Referenzkreuzung eignet sich als Zwischenform, weil sie besonders anschaulich ist und eine subjektive Beurteilung erlaubt. Je enger der Schlauch der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung nach der Abbildung der Messdaten in die Referenzkreuzung ist, desto besser sind die Gegebenheiten und Einflüsse auf die Versuchsfahrer berücksichtigt. Die Ausdehnung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung stellt die Unsicherheit dar, die durch Einflüsse auf den Fahrer entsteht, die in der Abbildung nicht berücksichtigt werden. Objektiv wird die Genauigkeit des Modells erhöht, je geringer die Standardabweichung der möglichen Belegt-Wahrscheinlichkeiten ist. Im (praktisch nicht erreichbaren) Idealfall, in dem alle Einflüsse auf den Fahrer berücksichtigt sind, werden alle Trajektorien auf eine einzige Zwischentrajektorie abgebildet. In der aktuellen Situation würde die Zwischentrajektorie perfekt in die Trajektorie abgebildet, die der Fahrer tatsächlich fahren wird.

Wie die Einflüsse der Straßenränder bei der Modellerstellung und Anpassung berücksichtigt werden, wird in 5.4.3 gezeigt. Ein weiteres Beispiel für das Nutzen von messbaren Gegebenheiten zur Verbesserung der Genauigkeit des Fahrerhaltensmodells ist es, die momentane Fahrzeuggeschwindigkeit in der Situation Durchfahren zu berücksichtigen. Dadurch wird die Genauigkeit des Modells und der Vorausberechnung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit in t-Richtung verbessert.

Beim Erzeugen des Modells werden zusätzlich zum Morphing die t-Koordinaten der 3D-Trajektorie eines Versuchs mit einem Streckfaktor m_t multipliziert, der aus der Eintrittsgeschwindigkeit des Fahrzeugs in den Voxel-Raum v_e und einer festgelegten Norm-Eintrittsgeschwindigkeit v_n berechnet wird:

$$m_t = \frac{v_e}{v_n}$$

Der angepasste t-Wert eines Trajektorienpunkts t_a berechnet sich aus dem Faktor und dem ursprünglichen t-Wert t_o :

$$t_a = m_t \cdot t_o$$

Die 3D-Trajektorien werden so auf eine Norm-Eintrittsgeschwindigkeit gestreckt.

Aus den angepassten Trajektorien wird die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für die Situation „Durchfahren“ erzeugt. Bei der Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit wird die Ausdehnung der Voxel in t-Richtung l_{Vt} der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung an die gemessene oder mit einem Modell vorausberechnete Eintrittsgeschwindigkeit in den Voxel-Raum v_e angepasst. Dazu wird die Standardausdehnung eines Voxels in t-Richtung $l_{Vt,o}$ durch den Streckfaktor m_t dividiert.

$$l_{Vt} = \frac{l_{Vt,o}}{m_t}$$

Mit der Ausdehnung der Voxel verschiebt sich die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung gemäß einer langsameren oder schnelleren Durchfahrt durch die Kreuzung. Bild 5-26 zeigt die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung für drei verschiedene Eintrittsgeschwindigkeiten in den Voxel-Raum.

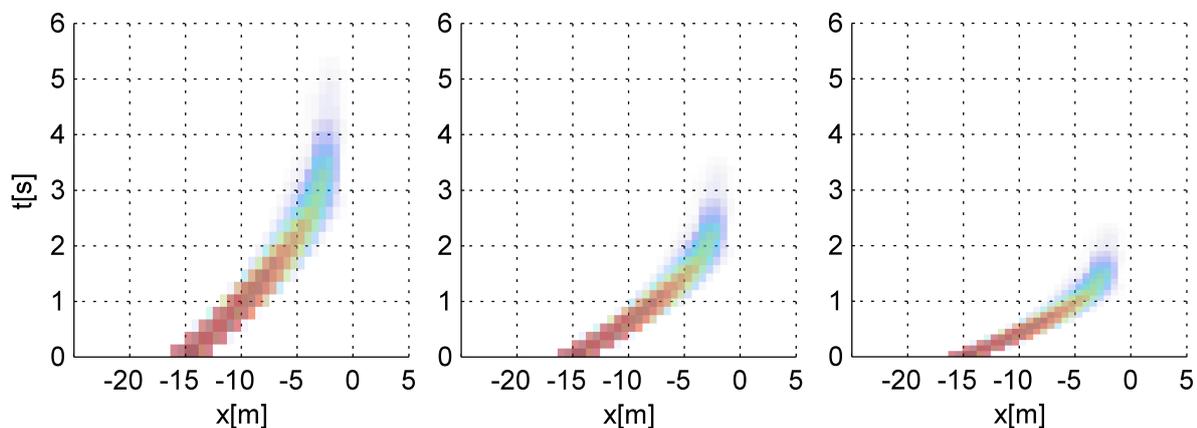


Bild 5-26: Anpassung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung an die Eintrittsgeschwindigkeit in den Voxel-Raum. Verteilung für 20 km/h (links), 30 km/h (Mitte) und 45 km/h (rechts)

Die Genauigkeit der Vorhersage wird durch das Einbeziehen der Eintrittsgeschwindigkeit erhöht. Dies zeigt sich bereits beim Erstellen des Modells. In Bild 5-27 sind die Trajektorien einer Kreuzung aus den Versuchen aus 5.3.1 dargestellt. Die Trajektorien sind einmal ohne Anpassung in t-Richtung eingezeichnet (grün) und einmal mit der Normierung auf eine Eintrittsgeschwindigkeit von 30 km/h. Die Darstellung zeigt bereits optisch, dass die Verteilung der Trajektorien weniger breit ist, wenn sie auf eine Eintrittsgeschwindigkeit genormt wurden.

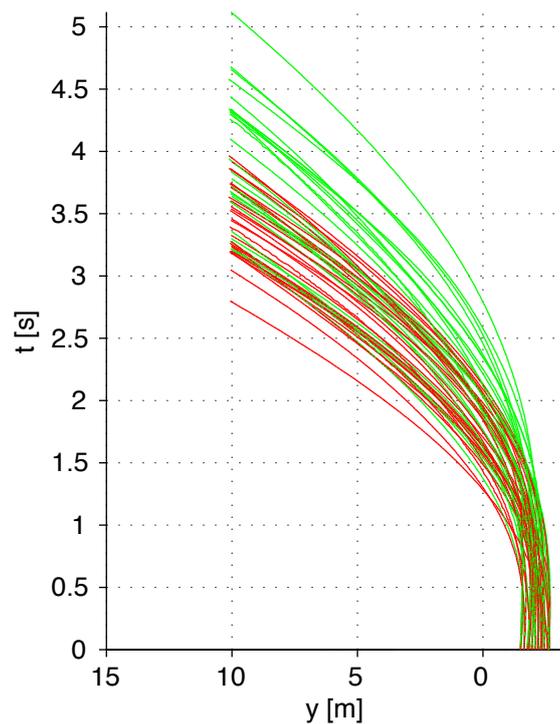


Bild 5-27: Trajektorien der durchgeführten Versuche an einer Kreuzung ohne (grün) und mit (rot) Zeitskalierung

Noch deutlicher wird der Gewinn an Genauigkeit in Bild 5-28 sichtbar. Dort ist die Verteilung des Zeitbedarfs für den Abbiegevorgang bei den durchgeführten Versuchsfahrten an einer Kreuzung mit und ohne Zeitskalierung dargestellt. Der Zeitbedarf ist hier als der Zeitraum definiert, in dem sich das Fahrzeug im Voxel-Raum aufhält. In Bild 5-27 entspricht dies der t-Koordinate des jeweils linken Endes der Trajektorien. Der geringere durchschnittliche Zeitbedarf von 3,460 s anstatt 3,981 s der angepassten Durchfahrten zeigt, dass die Normgeschwindigkeit höher gewählt wurde, als der tatsächliche Durchschnitt der Eintrittsgeschwindigkeit bei den Versuchen. Dies wird bei der Anpassung an die Eintrittsgeschwindigkeit in der aktuellen Situation ausgeglichen. Die Verbesserung der Genauigkeit zeigt sich durch die geringere Standardabweichung im Verhältnis zum Mittelwert des Zeitbedarfs. Diese ist bei den nicht skalierten Trajektorien 0,1301 und bei den skalierten Trajektorien 0,0850. In Tabelle 5-2 sind die Zahlen ohne und mit Zeitskalierung zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Zeitbedarf der aufgezeichneten Abbiegevorgänge der Situation „Durchfahren“ an einer Versuchskreuzung

Zeitbedarf der Abbiegevorgänge	Mittelwert s	Standardabweichung s	Standardabweichung/ Mittelwert
Ohne Zeitskalierung	3,981	0,5177	0,1301
Mit Zeitskalierung	3,460	0,2941	0,0850

In der Prototyp-Umsetzung wurde die Eintrittsgeschwindigkeit wie beschrieben berücksichtigt. Ist am Entscheidungspunkt der Voxel-Raum noch nicht erreicht, wird die aktuelle Geschwindigkeit v_{ego} anstelle der Eintrittsgeschwindigkeit v_e zur Skalierung benutzt. Die Praxis zeigt, dass der Entscheidungspunkt immer nah am Voxel-Raum liegt, weswegen die Genauigkeit der Näherung für ein Prototypsystem ausreichend ist.

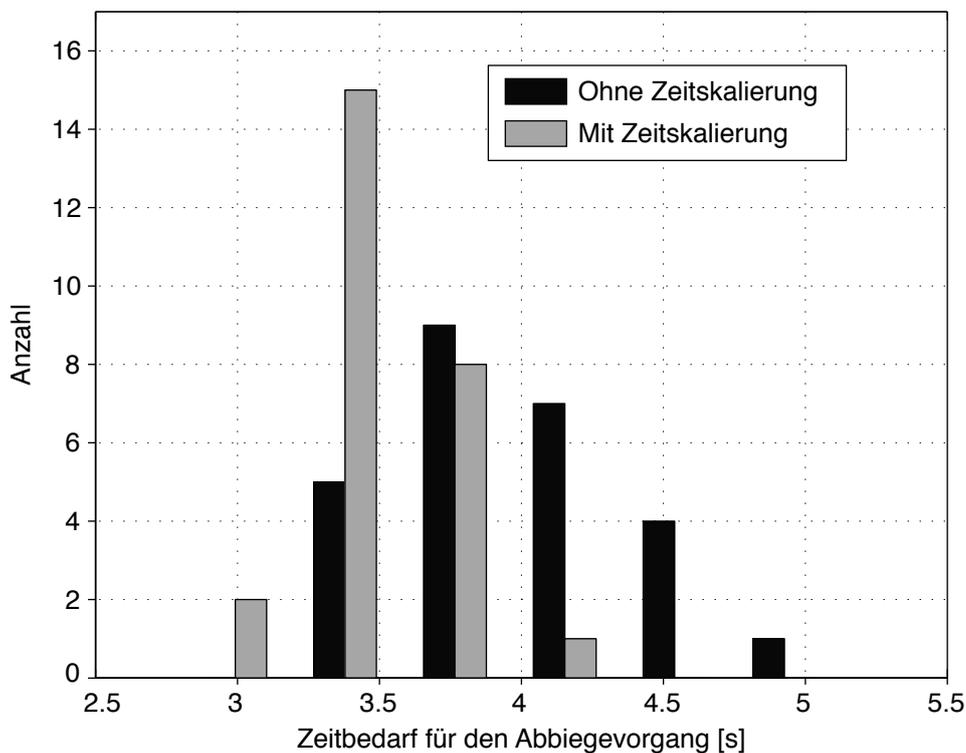


Bild 5-28: Verteilung des Zeitbedarfs für des Abbiegevorgang an einer einzelnen Kreuzung mit und ohne Skalierung der Zeitachse

Ein Fahrerverhaltensmodell, das auf einer Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung beruht, fasst die möglichen Trajektorien in der Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit zusammen. Durch das Berücksichtigen der Einflüsse auf den Fahrer kann die Genauigkeit der Berechnung erhöht werden. Ein alternativer Ansatz besteht darin, die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit mit einer einzelnen konkreten Trajektorie durchzuführen. Diese Trajektorie kann beispielsweise am Entscheidungspunkt aus einem Pool von im Modell gespeicherten Trajektorien durch einen Entscheidungsalgorithmus ausgewählt werden. Die Entscheidung kann auf den Daten des aktuellen Fahrzustands (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Spur usw.), dem Verlauf dieser Größen bei der Annäherung an die Kreuzung oder auf einem kurzfristigen oder langfristigen Fahrerprofil beruhen. Nach der Auswahl einer Trajektorie kann zusätzlich eine Anpassung an die Straßenränder der aktuellen Kreuzung wie in 5.4.3.4 beschrieben erfolgen. Die Auswahl einer Trajektorie bietet die Möglichkeit einer noch genaueren Vorhersage über das Fahrerverhalten beim Abbiegen. Der Bedarf an Speicher für den Trajektorienpool und Rechenleistung für Auswahl der Trajektorie und Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit ist aber deutlich höher als bei einem Fahrerverhaltensmodell, das auf einer Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung beruht.

Eine Mischung aus der aufwendigen Auswahl einzelner Trajektorien und einer Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung ist die Möglichkeit, mehrere Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilungen für eine Situation aber verschiedene Fahrertypen (z.B. sportlich, normal oder langsam) im Modell zu hinterlegen und bei der Annäherung an die Kreuzung eine Verteilung auszuwählen.

5.5 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die primäre Handlung des Linksabbiegeassistenzsystems ist eine autonome Bremsung (siehe 5.3.2) ohne Zutun des Fahrers. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle ist aus zwei Gründen dennoch von großer Bedeutung. Zum einen hat das Lenkverhalten, das vollständig in der Hand des Fahrers bleibt, Einfluss darauf, ob ein möglicher Unfall verhindert werden kann (siehe 5.3.3.4), zum anderen kann der Fahrer durch eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle die Grenzen des Systems kennen lernen und im Fall eines Systemeingriffs den Grund der Handlung erkennen.

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle des Prototypsystems besteht aus mehreren Teilen. Der wichtigste Teil ist die autonome Bremsung, die gleichzeitig für eine kinesthetische Rückmeldung beim Fahrer sorgt. Zugleich ertönt ein Warnton, der dem Fahrer signalisiert, dass die Verzögerung durch einen Fahrzeugeingriff ausgelöst wird. Um dem Fahrer den Grund des Eingriffs anzuzeigen, wird im Head-Up-Display (HUD) ein Warnsymbol (siehe Bild 5-29) eingeblendet.



Bild 5-29: Warnsymbol im Head-Up-Display bei Systemeingriff

In der Situation „Anfahren“ wurde zusätzlich zum Eingriff eine Informationsstufe implementiert (siehe Bild 5-30). 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. Dies gibt dem Fahrer die Möglichkeit, Funktion und Grenzen des Systems zu erlernen. In der Situation „Durchfahren“ wird die Information nicht eingeblendet, da sich die Kollisionswahrscheinlichkeit bei der Annäherung an die Kreuzung sehr schnell ändern kann und eine entsprechend schnell wechselnde Anzeige den Fahrer stark ablenkt.



Bild 5-30: Info-Symbol im Head-Up-Display bei der Situation Anfahren

Um dem Fahrer die Möglichkeit zu geben, den Linksabbiegeassistenten jederzeit übersteuern zu können, wird das System durch kurzes Drücken des Fahrpedals über den Kick-Down-Punkt für die aktuelle Kreuzung deaktiviert. Ein gerade laufender Eingriff wird unterbrochen.

Die Informations-Anzeige und die Möglichkeit des Übersteuerns durch die Kick-Down-Betätigung ermöglichen dem Fahrer, den Assistenten bewusst in knappen Situationen zu deaktivieren, was bei sehr hohem Gegenverkehrsaufkommen und entsprechend kleinen Lücken nötig sein kann.

5.6 Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung

Bei der Fahrumgebungserfassung eines Linksabbiege-Assistenzsystems sind zwei Bereiche zu unterscheiden, die Erfassung der entgegenkommenden Fahrzeuge und die Erfassung der Gegebenheiten und Einflüsse auf das Fahrverhalten des eigenen Fahrers.

5.6.1 Umfang der Erfassung

Essentiell für ein Linksabbiege-Assistenzsystem ist die Erfassung des Gegenverkehrs in allen vom System unterstützten Situationen. Folgend Punkte sind dabei zu berücksichtigen:

- Reichweite R_s der Erfassung:
Die nötige Reichweite ist abhängig vom Zeitbedarf beim Abbiegen und der Geschwindigkeit der entgegenkommenden Fahrzeuge.
- Bereich der Erfassung:
Um Krümmungen in der Gegenverkehrsfahrbahn und Winkel der Ego-Fahrzeug-Achse zur Gegenverkehrsfahrbahn auszugleichen, muss ein breiter Bereich vor dem eigenen Fahrzeug erfassbar sein.
- Anzahl der Fahrzeuge:
Bei entgegenkommenden Kolonnen müssen mehrere entgegenkommende Fahrzeuge erfasst werden.

- Unempfindlichkeit gegen Verdeckungen:
Mehrere entgegenkommende Fahrzeuge können sich gegenseitig verdecken. Ebenso können Fahrzeuge, die sich bei X-Kreuzungen in Gegenrichtung zum Abbiegen aufstellen, die Einsicht in die Gegenfahrbahn verdecken.
- Anzahl der erfassbaren Spuren:
Wird auf mehrspurigen Straßen abgebogen, müssen mehrere Spuren erfasst und differenziert werden.

Ein Assistenzsystem für Linksabbiegesituationen, das auch außerorts eingesetzt wird, muss Gegenverkehr mit Geschwindigkeiten bis über 100 km/h erfassen können. Die nötige Erfassungsreichweite wird mit folgenden Parametern abgeschätzt:

- maximale Geschwindigkeit des Gegenverkehrs $v_{Geg} = 130 \text{ km/h} = 36,11 \text{ m/s}$
- maximaler Zeitbedarf für das Abbiegen an größeren Kreuzungen $t_{max} = 5 \text{ s}$
- Durchschnittsgeschwindigkeit bei der Annäherung $v_{ego} = 25 \text{ km/h} = 6,94 \text{ m/s}$
- Erfassungsdauer für das entgegenkommende Fahrzeug $t_{erf} = 1 \text{ s}$

Die nötige Reichweite R_s berechnet sich zu:

$$R_s = v_{Geg} \cdot (t_{max} + t_{erf}) + v_{ego} \cdot t_{erf} = 223,6 \text{ m}$$

Soll das System nur innerhalb von geschlossenen Ortschaften mit einer Maximalgeschwindigkeit v_{Geg} der entgegenkommenden Fahrzeuge von 70 km/h eingesetzt werden, verringert sich die notwendige Reichweite R_s auf 123,6 m.

Die Anzahl der entgegenkommenden Fahrzeuge n_{erf} , die zu erfassen sind, kann mit dem durchschnittlichen Zeitabstand zwischen den Fahrzeugen t_{ab} abgeschätzt werden:

$$n_{erf} \geq \frac{t_{max} + t_{erf}}{t_{ab}}$$

Unter der Annahme, dass der gesetzlich vorgeschriebene Mindestabstand (1,8 s) von allen Fahrzeugen nur zur Hälfte eingehalten wird ($t_{ab} = 0,9 \text{ s}$), sind bis zu sieben Fahrzeuge auf einer Spur zu erfassen. Bei mehreren Gegenverkehrsspuren erhöht sich die Anzahl entsprechend. Mehr als zwei Gegenverkehrsspuren müssen kaum berücksichtigt werden, da auf Straßen mit drei oder mehr Spuren in eine Fahrtrichtung in den seltensten Fällen nach links abgebogen werden kann und wenn, dann nur mit Ampelregelung und eigener Ampelphase.

In 5.4.3 ist die Anpassung des Fahrerhaltensmodells an die aktuelle Situation aufgrund der aktuellen Straßenränder beschrieben. Für die Anpassung müssen die Straßenränder in einem Umfang und mit einer Genauigkeit erfasst werden, die erlaubt, die Bezugslinien für das Morphing abzuleiten. Jeder weitere Einfluss auf das Fahrerhalten, der bei einer Modellanpassung berücksichtigt wird (siehe 5.4.6), muss ebenso erfasst werden.

5.6.2 Sicherheit der Erfassung

Analog zum Stop-Schild-Assistenzsystem (vgl. 4.4.1) können bei einem Linksabbiegeassistentenzsystem die beiden Fehlerklassen False-Positive (fehlerhafte Systemauslösung, obwohl nicht nötig) und False-Negative (keine Systemauslösung, obwohl nötig) unterschieden werden. Bei einem Linksabbiegeassistentenzsystem, das nur in Längsrichtung eingreift, besteht ohnehin die Problematik des Eingriffsdilemmas (vgl. 5.3.3.4), das eine perfekte Funktionalität des Assistenzsystems nicht darstellbar macht. Dennoch ist eine hohe Sicherheit der Fahrumgebungserfassung notwendig. Die Systemgrenzen, die aus dem Eingriffsdilemma entstehen, sind reproduzierbar und vom Fahrer, zumindest in Grenzen, erlernbar und damit vorhersagbar. Fehler aufgrund falscher Umgebungserfassung sind im Allgemeinen nicht reproduzierbar oder vorhersagbar. Damit erschweren sie ein Erlernen der Systemgrenzen durch den Fahrer. False-Negative-Fehler sind bei einem eingreifenden Linksabbiegeassistentenzsystem noch kritischer zu bewerten als bei einem warnenden Stop-Schild-Assistenten. Führt der Fahrer absichtlich ein kritisches Fahrmanöver durch, um den Assistenten auszulösen, so hat er keine Chance, den Unfall durch einen Eingriff in Längsrichtung zu verhindern, wenn die Auslösung unterbleibt (vgl. 5.3.3.3). False-Positive-Auslösungen bergen nicht nur die Gefahr eines „Cry-Wolf-Effekts“ (siehe 4.4.1), sondern stellen durch den autonomen Eingriff auch eine unmittelbare Gefährdung für nachfolgende Fahrzeuge dar. Da nur aus geringen Geschwindigkeiten gebremst wird, ist die Gefährdung nicht als gravierend zu betrachten.

Bei False-Positive-Eingriffen besteht die besondere Gefahr, dass das Fahrzeug nicht mehr auf der eigenen Spur angehalten wird, sondern auf der Gegenverkehrsspur. Dadurch wird eine besonders kritische Situation erst erzeugt. Bei der Entscheidung über eine Systemauslösung besteht in praktisch allen Fällen Unsicherheit, ob das Fahrzeug noch auf der eigenen Fahrspur angehalten werden kann (siehe 5.3.3.4). Voraussetzung für eine ausreichende Absicherung ist aber in jedem Fall, dass die Straßenränder und Fahrbahnbegrenzungen dem System mit hoher Genauigkeit zur Verfügung stehen.

5.6.3 Qualität der Erfassung

Die Genauigkeit der Erfassung des Gegenverkehrs kann in Erfassung in Längs- und Querrichtung unterteilt werden. In Längsrichtung ist die Entfernung der Fahrzeuge, ihre Geschwindigkeit und bei einem quadratischem Gegenverkehrsmodell ihre Beschleunigung zu erfassen. Die nötige Genauigkeit der drei Parameter ist voneinander und von ihrer Gewichtung im Gegenverkehrsmodell abhängig. Die Genauigkeit der Vorausberechnung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Gegenverkehrs beeinflusst die Genauigkeit der Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit (siehe 5.4.3.4). Die Genauigkeit des Gegenverkehrsmodells ist durch die Begrenzung der Vorhersagbarkeit des Verhaltens der Fahrer der entgegenkommenden Fahrzeuge begrenzt. Die Messung der Gegenverkehrsparameter sollte so genau sein, dass die dadurch entstehenden Fehler bei der Vorausberechnung der Gegenverkehrsposition $e_{Mess,Geg,y}$ geringer sind als die unvermeidbare Ungenauigkeit aufgrund des nicht vorhersagbaren Verhaltens des Fahrers des entgegenkommenden Fahrzeugs $e_{Vor,Geg,y}$. Um diese Ungenauigkeit abzuschätzen, kann die Situation eines Wechsels von Konstantfahrt zu Schubetrieb beim Gegenverkehrsfahrzeug angenommen werden. Durch Luftwiderstand und Schlepptomment stellt sich eine Verzögerung ein, die mit $a_{schlepp} = 1 \text{ m/s}^2$ angenommen wird. Bei einer durchschnittlichen Abbiegedauer $t_d = 2,5 \text{ s}$ und einer entsprechen-

den zeitlichen Entfernung des Gegenverkehrsfahrzeugs entsteht eine Ungenauigkeit der Vorausberechnung in y-Richtung von:

$$e_{Vor,Geg,y} = \frac{1}{2} a_{schlepp} t_d^2 = 3,1 \text{ m}$$

Der maximale Fehler aufgrund von Ungenauigkeiten der Erfassung $e_{Mess,Geg,y}$ mit einem linearen Modell berechnet sich zu:

$$e_{Mess,Geg,y} = e_{Geg,y} + t_d \cdot e_{Geg,v}$$

Dabei ist $e_{Geg,y}$ der direkte Fehler der Positionsbestimmung des Gegenverkehrs in y-Richtung und $e_{Geg,v}$ der Fehler der Geschwindigkeitsmessung des Gegenverkehrs. Die Bedingung $e_{Mess,Geg,y} < e_{Vor,Geg,y}$ ist im gezeigten Fall beispielsweise für $e_{Geg,y} = 1 \text{ m}$ und $e_{Geg,v} = 0,8 \text{ m/s}$ erfüllt. Genauere Aussagen bezüglich nötiger Messgenauigkeiten in verschiedenen Gegenverkehrssituationen bedürfen weitergehender Untersuchungen zur Genauigkeit der Vorausberechenbarkeit der Gegenverkehrsposition aufgrund des Fahrerverhaltens.

Die Erfassung der Gegenverkehrsposition in Querrichtung dient dem Zuordnen einer Fahrspur bei mehreren Gegenverkehrsspuren und dem Erkennen der seitlichen Entfernung des Fahrzeugs von der Fahrspurmitte, der Spurablage. Die Zuordnung der Fahrspur kann mit einer Genauigkeit von etwa 1,5 m erreicht werden. Um die Spurablage für die Verbesserung der Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit nutzen zu können sind Genauigkeiten besser als 1 m erforderlich.

Bei der Erfassung der Straßen- und Fahrbahnränder ist die Qualität der Erfassung unmittelbar mit der Sicherheit des Systems verknüpft (siehe 5.6.2). Die notwendige Genauigkeit für die Positionierung der Straßen- und Fahrbahnränder zum Ego-Fahrzeug liegt bei kleineren Kreuzungen im Bereich unter 0,5 m. Die Auflösung, mit der die Straßenränder erfasst werden, muss hoch genug sein, um eine automatisierte Suche nach Orientierungspunkten für ein Image-Morphing-Verfahren (siehe 5.4.3.2) zu ermöglichen. Die tatsächlich nötige Auflösung hängt davon ab, ob noch weitere Informationen, wie beispielsweise die Krümmung des Straßenrands zur Verfügung stehen, und welche Orientierungspunkte genau gefunden werden müssen. Als Richtwert kann eine Auflösung von 20 cm angenommen werden.

5.6.4 Mögliche Erfassungsmethoden

Die Erfassung des Gegenverkehrs ist mit bordautonomer Sensorik nur schwer darstellbar. Die nötige Reichweite und die Sicherheit gegen Verdeckungen, besonders bei mehrspurigen Straßen, werden von verfügbaren und geplanten Sensoren kaum erreicht. Bei eingeschränkter Funktionalität (geringere Geschwindigkeit, nur eine Gegenverkehrspur) ist die Erfassung mit bordautonomer Sensorik denkbar.

Eine Alternative zur bordeigenen Sensorik für die Erfassung des Gegenverkehrs ist die Kommunikation, z.B. über Ad-Hoc-Netzwerke, zwischen abbiegendem Fahrzeug und den Gegenverkehrsfahrzeugen oder dem abbiegenden Fahrzeug und ortsfester Infrastruktur. Im ersten Fall ist es den Fahrzeugen möglich, direkt Positions- und Fahrdynamikdaten auszutauschen. Mit direkter Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation können mehr Daten ausgetauscht werden, als über Sensorik erfasst werden. Prinzipiell stehen alle im Bordnetz eines Fahrzeugs verfügbaren Daten zum Austausch zur Verfügung. Die Reichweite der Kommunikationsmethoden im Forschungsstadium ist mit etwa 500 m deutlich höher als die einer bordeigenen Sensorik [KOSCH 2004, S. 6]. Eine direkte Positionsbestimmung mit Ad-Hoc-Netzwerken, wie von ČAPKUN [2002, S. 2] gezeigt, kann die Genauigkeit der Entfernungsbestimmung verbessern.

Informationen über örtliche unveränderliche Gegebenheiten, beispielsweise über die Fahrbahnränder, können dem System von zukünftigen erweiterten digitalen Karten zur Verfügung gestellt werden. Die Position des Fahrzeugs kann über GPS oder das im Aufbau befindliche Galileo-System erfasst werden, wobei die nötige Genauigkeit der Erfassung nur mit Differential-Systemen erreicht werden kann. Mit Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation kann die Aktualität der Kartendaten sichergestellt werden.

5.7 Systemumsetzung und Test

Die Machbarkeitstests für die Linksabbiegeassistentenz wurden ausschließlich im Simulator durchgeführt, da eine geeignete Fahrumgebungserfassung, insbesondere für den Gegenverkehr, für die Umsetzung in einem Prototypfahrzeug nicht zur Verfügung stand. Realversuche mit dem beschriebenen Linksabbiegeassistentenzsystem bedürfen darüber hinaus eines umfangreichen Sicherheitskonzeptes, da selbst ein voll funktionsfähiges System nicht jeden Unfall verhindern kann (siehe 5.3.3.4).

Die durchgeführten Voruntersuchungen im dynamischen Fahrsimulator hatten folgende Ziele:

- Test des Versuchsdesigns
- Erkennen von Besonderheiten im Fahrerverhalten an Kreuzungen in der Fahrsimulatorumgebung
- erste Tests des Systems „Linksabbiegeassistentenz“ mit Fahrern, die das System nicht, oder nur im geringen Maße kennen
- Überprüfen der Annahme, dass ein Warnsystem nicht ausreicht, um Unfälle in der Situation Durchfahren zu verhindern

5.7.1 Implementierung in Matlab-Simulink

Die Implementierung des Linksabbiegeassistentenz erfolgte analog zur Implementierung des Stop-Schild-Assistentenz (siehe 4.5.1) in Matlab-Simulink. Die beiden Teilsysteme „Kollisionswahrscheinlichkeit“ und „Abbiegeabsicht“ wurden als Subsysteme implementiert. Die Umsetzung der

Neuronalen Netze zur Erkennung der Abbiegeabsicht erfolgte mit der Neural-Networks-Tool-Box und der Fuzzy-Logic-Toolbox [CORINO 2005, S. 25].

Die Erkennung der Kollisionswahrscheinlichkeit wurde inklusive des in 5.4.3.1 beschriebenen Field Morphing Algorithmus in Simulink umgesetzt. Die Anbindung an die Fahrsimulationssoftware erfolgte über spezielle Schnittstellenblöcke (realisiert als „S-functions“). Diese lassen dabei die freie Abfrage beliebiger Punkte der Straßen- und Spurränder zu. Die Schnittstelle ist anwendungs- und lösungsneutral und damit für alle Systeme geeignet, die Informationen über die Straßenränder verarbeiten. Die dem Simulink-Modell zur Verfügung gestellten Daten sind damit auf einer vergleichbarer Abstraktionsebene wie die Daten, die von zukünftigen erweiterten digitalen Karten zu erwarten sind (siehe 5.6.4). Das automatisierte Erstellen der Orientierungslinien aus den Daten der Fahrbahn­ränder (siehe 5.4.3.2) wurde ebenfalls im Simulink-Modell umgesetzt.

Wie beim Stop-Schild-Assistent eignet sich die Anbindung an die Simulatorsoftware für Co-Simulation über Netzwerk oder am Simulationsrechner. Für die Simulatorversuche wurde das Modell über den RealTime-Workshop und Kompilieren als Plug-In in die Fahrsimulationssoftware eingebunden.

5.7.2 Aufbau des Simulatorversuchs

Um die Funktion und die Wirksamkeit des Linksabbiegeassistenzsystems mit Probanden zu testen, die das System nicht kennen, wurde die Möglichkeit geschaffen, die typischen Fehler, die Linksabbiegeunfällen vorausgehen, bei den Probanden zu provozieren.

Den Probanden wurde eine Strecke vorgegeben, der sie folgen sollten. Die Probanden wurden gebeten, eine Geschwindigkeit von 60 km/h möglichst genau einzuhalten, wenn es die Fahr­situation erlaubt. Die Route wurde durch ein simuliertes Navigationssystem angezeigt, das Pfeile und Entfernungsangaben im virtuellen Head-Up-Display einblendet. Auf der vorgegebenen Strecke muss an insgesamt sechs Kreuzungen mit einer Gegenverkehrssituation links abgebogen werden. Dabei wurden Gegenverkehrsfahrzeuge automatisiert so aufgesetzt, dass sie die Kreuzungen gleichzeitig mit den Probanden erreichten. Je nach Kreuzung wurden einzelne Fahrzeuge oder Gruppen mit mehreren Fahrzeugen aufgesetzt. Beim Erreichen der Kreuzung fanden die Probanden eine definierte Gegenverkehrssituation vor, die, abhängig von der Kreuzung, dazu führte, dass sie anhalten und auf eine Lücke warten mussten, oder direkt noch vor dem ersten Gegenverkehrsfahrzeug oder in einer Lücke im Gegenverkehr durch die Kreuzung fahren konnten.

Aus der Unfallanalyse ist ersichtlich, dass das Übersehen oder falsch Einschätzen von entgegenkommenden Fahrzeugen die häufigsten Fehler sind, die zu Linksabbiegeunfällen führen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von CHOVAN ET AL. [1994 S. 13] überein. Um einen entsprechenden Fehler bei den Probanden zu provozieren, wurden zwei Möglichkeiten implementiert. Bei der ersten Möglichkeit, Hyperbeschleunigung genannt, wird das erste Fahrzeug hinter der Lücke im Gegenverkehr ab einem bestimmten Abstand zur Kreuzung automatisch mit dem in der Realität unmöglichen Wert von 20 m/s^2 beschleunigt. Der Zeitpunkt und die Dauer der Beschleunigung sowie die Größe der Lücke sind so gewählt, dass der Proband die Lücke als ausreichend einschätzen soll, das Abbiegen aber aufgrund des sich plötzlich sehr viel schneller nähernden Gegenverkehrsfahrzeugs zu einer Kollision führt. Bei der zweiten Möglichkeit, Auftaucher genannt, wird ein zusätzliches Gegenverkehrsfahrzeug mit einer Geschwindigkeit vom 50 km/h kurz vor der

Kreuzung manuell vom Versuchsleiter eingesetzt, was ebenfalls zu einer Kollision führt, wenn der Proband abbiegt. Hyperbeschleunigung und Auftaucher können für jede Kreuzung vom Versuchsleiter einzeln aktiviert werden.

Die Versuche wurden im dynamischen Simulator der BMW Group Forschung und Technik durchgeführt. Insgesamt 17 Versuchspersonen durchfuhren die Strecke, wobei ein erster Durchlauf zur Eingewöhnung in die Simulator-Umgebung diente. Die Fehler-Provokation war dabei abgeschaltet. Sie wurde bei verschiedenen Probanden an unterschiedlichen Kreuzungen zum ersten Mal aktiviert, um besondere Einflüsse einer Kreuzungssituation auf die Versuchsergebnisse zu minimieren und die leicht unterschiedlich aufgesetzten Gegenverkehrssituationen an den verschiedenen Kreuzungen zu testen. Die erste Aktivierung liefert dabei die wichtigsten Ergebnisse, da den Probanden dabei weder Assistenzsystem, noch die Art der Fehler-Provokation bekannt sind.

Die Handlung des Linksabbiegeassistentzsystems wurde bei sechs Probanden auf eine Warnung beschränkt. Damit sollte überprüft werden, dass eine Warnung als Systemhandlung nicht ausreichend ist, um den Unfall zu verhindern (siehe 5.3.3.3).

5.7.3 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind anhand der unterschiedlichen Fragestellungen in mehrere Bereiche zu unterteilen.

Der Versuch zeigte, dass der Versuchsaufbau noch nicht optimal geeignet ist, die Wirksamkeit des Linksabbiegeassistentzsystems zu überprüfen. Insbesondere ergaben sich folgende Probleme:

- Die Steuerung der Geschwindigkeit der entgegenkommenden Fahrzeuge war zu ungenau, um die Gegenverkehrslücke zuverlässig im gewünschten zeitlichen Abstand zum Ego-Fahrzeug zur Kreuzung zu bringen. Besonders der zeitkritische Start der Hyperbeschleunigung erfolgt oft zu früh oder zu spät.
- Das Fahrverhalten der Probanden im Simulator unterscheidet sich vom Fahrverhalten auf der Straße. Die Abbiegegeschwindigkeiten sind zum Teil höher, die Annäherung an die Kreuzung bei manchen Probanden aber auch extrem vorsichtig. Dies führte dazu, dass die vorgesehene Lücke vom Probanden oft nicht genutzt wurde oder die Probanden so schnell und mit enger Trajektorie abbogen, dass trotz der Beschleunigung des Gegenverkehrs keine kritische Situation erzeugt wurde.
- Das manuelle Einsetzen der Auftaucher durch den Versuchsleiter stellt sich als äußerst schwierig dar, besonders in der Situation „Durchfahren“. Hier hat der Versuchsleiter dasselbe Problem wie das Assistenzsystem beim Erkennen des Abbiegepunkts: Er weiß nicht, ob der Fahrer eine enge oder eine weite Trajektorie wählt (siehe 5.3.2). Aus diesem Grund konnte in vielen dieser Situationen kein Fehler provoziert werden, da der Auftaucher zu früh eingesetzt wurde und der Proband noch anhalten konnte, oder zu spät, und der Proband noch vor dem Auftaucher abbiegen konnte.
- In den Fällen, in denen vom System nur eine Warnung ausgegeben wurde, reagierten die Probanden oft mit einer Beschleunigung und schnellem Einlenken. Dieses Verhalten ist erklärbar, da die Entfernung des Gegenverkehrsfahrzeugs zum Zeitpunkt der Warnung

noch hoch ist, die plötzliche Beschleunigung von den Probanden nicht erkannt wird, und das schnelle Abbiegen dem initiierten Handlungsmuster besser entspricht als ein Abbruch des Abbiegevorgangs und eine Bremsung.

Aufgrund der Probleme bei den Versuchen konnte die angestrebte Anzahl an Einzelsituationen nicht erreicht werden. Eine Aussage über die Wirksamkeit einer Warnung ist mit den Versuchsergebnissen nicht möglich, da nur zwei Probanden in jeweils einer Situation nach einer Warnung bremsen. Weitere Versuche sind hierzu nötig.

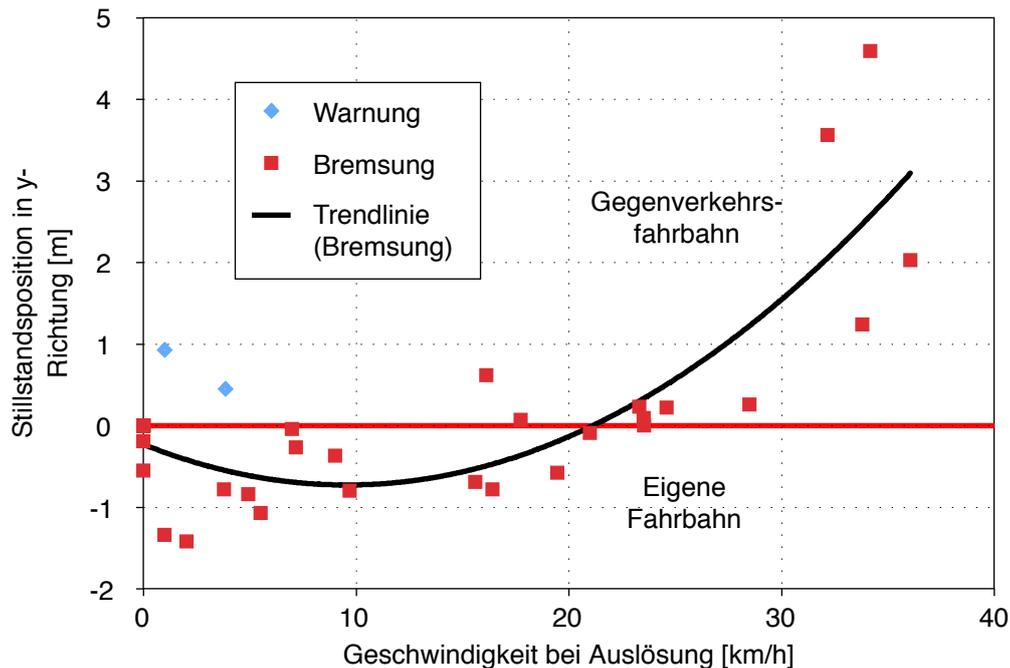


Bild 5-31: Simulatorversuch: Y-Koordinate der Stillstandsposition der linken vorderen Fahrzeugecke nach der Handlungsauslösung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei der Auslösung

Bei der autonomen Bremsung konnte in 26 Fällen eine Auslösung erreicht werden. Bild 5-31 zeigt den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs bei der Handlungsauslösung und der Position der linken vorderen Fahrzeugecke bei Stillstand, wobei negative Werte einer Position innerhalb der eigenen Fahrspur entsprechen. Die Ergebnisse der Situationen mit autonomer Bremsung bestätigen die Ergebnisse der Auswertung der Real-Fahrversuche (siehe 5.3.3.3). Erst bei höheren Abbiegegeschwindigkeiten über 30 km/h sind die Eindringtiefen in die Gegenverkehrsfahrbahn so groß, dass eine Kollision wahrscheinlich ist.

Die Ergebnisse der Wirksamkeitsuntersuchung sind unter dem Aspekt des breiter gestreuten Fahrverhaltens im Simulator zu beurteilen. So ist der Anteil der Abbiegevorgänge mit hoher Geschwindigkeit bei den Simulatorversuchen größer.

Um bei weiterführenden Simulatorversuchen zum Linksabbiegeassistenzsystem den Anteil der erfolgreich provozierten Fehler und damit der Systemauslösungen zu erhöhen, kann der Proband unter stärkeren Zeitdruck gesetzt werden, beispielsweise durch die Aufgabe, einem vorausfahrenden

5. Linksabbiegeassistenz

dem Fahrzeug zu folgen. Auf diese Weise wird der Druck auf die Probanden erhöht, jede Lücke im Gegenverkehrsstrom, und damit die für die Fehler-Provokation vorgesehene zu nutzen.

Die Provokation des Fehlers mit einem Auftaucher kann optimiert werden, indem der Auftaucher nicht direkt vom Versuchsleiter eingesetzt wird, sondern automatisch in dem Moment, in dem die Abbiegerkennung der Linksabbiegeassistenz einen Abbiegepunkt findet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In den letzten Jahren konnte die Zahl der Unfallopfer im Straßenverkehr durch Verbesserung der Aktiven und Passiven Sicherheit stark verringert werden. Dieser Trend wird sich noch weiter fortsetzen. Zur langfristigen weiteren Reduzierung von Unfall- und Opferzahlen sind Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen notwendig. Aufgrund der großen Vielfalt an möglichen Kreuzungssituationen und deren hoher Komplexität sind herkömmliche Entwicklungsmethoden für Aktive Sicherheitssysteme mit einer Bottom-Up-Vorgehensweise nur schwer zielführend zu gestalten.

In dieser Arbeit wird ein top-down-orientierter Entwicklungsprozess vorgestellt, mit dem die Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen auf das tatsächliche Unfallgeschehen ausgerichtet werden kann und der gleichzeitig die Umsetzbarkeit der definierten Systeme durch eine parallele Machbarkeits-Abschätzung sicherstellt.

Ausgangsbasis für die top-down-orientierte Methode zur Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen ist eine Analyse des realen Unfallgeschehens. Im Rahmen der Arbeit wurde eine umfassende Unfallanalyse mittels Expertenbefragung, Auswertung von Unfallstatistiken und Einzelunfallanalyse durchgeführt. Aus der Analyse ergeben sich vier Unfalltypen an Kreuzungen, für die Aktive Sicherheitssysteme sinnvoll erscheinen. Für zwei dieser Unfalltypen wurden im Rahmen dieser Arbeit prototypische Aktive Sicherheitssysteme, ein Stop-Schild-Assistent und eine Linksabbiegeassistentz, entwickelt.

Der Stop-Schild-Assistent verhindert einen Unfalltyp, bei dem die Fahrer ungebremst über eine Kreuzung mit Stop-Schild fahren, weil sie nicht erkennen, dass sie nicht vorfahrtsberechtigt sind. Der Stop-Schild-Assistent erkennt aus dem Annäherungsverhalten, ob der Fahrer das Stop-Schild bemerkt hat, und warnt im Fehlerfall zu einem Zeitpunkt, an dem der Fahrer das Fahrzeug noch vor der Stop-Linie anhalten kann. Für die Analyse des Fahrerverhaltens wurden mehrere Verfahren entwickelt und verglichen. In einem analytischen Ansatz werden Beobachter für verschiedene Kriterien des Fahrerverhaltens, beispielsweise die Fahr- oder Bremspedalbetätigung, benutzt und deren Ergebnisse gewichtet. Alternativ wurden verschiedene neuronale Netze entwickelt, die das Annäherungsverhalten beurteilen. In Fahr- und Simulatorversuchen konnte die prototypische Funktionsfähigkeit des Stop-Schild-Assistenten nachgewiesen werden. Die Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung sind eine hohe Sicherheit der Erfassung zur Vermeidung von Fehlauflösungen und eine Genauigkeit der Entfernungsmessung zum Stop-Schild besser 2 m. Die Anforderungen sind durch eine Kombination einer kartenbasierten Entfernungsmessung mit hochgenauem GPS und einer Kameraerfassung zur Absicherung prinzipiell erfüllbar.

Die Linksabbiegeassistentz verhindert den Zusammenstoß zwischen einem links abbiegenden Fahrzeug und einem entgegenkommenden Fahrzeug. Die Situationsinterpretation der Linksabbiegeassistentz besteht aus zwei Teilen, dem Erkennen der Abbiegeabsicht und dem Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit. Besteht eine konkrete Abbiegeabsicht und eine hohe Kollisionswahrscheinlichkeit, verhindert das System durch eine autonome Bremsung das Abbiegen. Die

Verkehrssituation bei der Linksabbiegeassistent ist im Vergleich zum Stop-Schild-Assistent wesentlich komplexer, da neben der Längs- auch die Querdynamik des Fahrzeugs darüber entscheidet, ob die Situation kritisch ist. Die durchgeführten Fahrversuche zeigen, dass aufgrund der freien Trajektorienwahl des abbiegenden Fahrers und des geringen Wegs bis zum Eindringen in die Gegenverkehrsfahrbahn eine Warnung den Unfall in den meisten Fällen nicht verhindern kann, eine autonome Bremsung jedoch bei den untersuchten Fahrsituationen wirksam ist.

Die Abbiegeabsicht des Fahrers wird mit zwei neuronalen Netzen erkannt, von denen das erste den Beginn eines Einlenkvorgangs und das zweite die Absicht des Fahrers, vor dem Queren der Gegenverkehrsfahrbahn anzuhalten erkennt. Beide Netze berücksichtigen neben dem Fahrerverhalten auch die Position des Fahrzeugs auf der Kreuzung sowie geometrische Merkmale der Kreuzung.

Die Kollisionswahrscheinlichkeit muss zu Beginn des Abbiegevorgangs ermittelt werden, wofür ein Modell des zukünftigen Fahrerverhaltens benutzt wird. Beim Linksabbiegevorgang sind Aufenthaltsort und Aufenthaltsdauer bei der Betrachtung der Kollisionswahrscheinlichkeit eng verknüpft. Deshalb wurde ein Fahrerverhaltensmodell entwickelt, das eine gemeinsame Betrachtung von örtlicher Trajektorie und Geschwindigkeitsverlauf erlaubt. Die Trajektorie eines Fahrzeugs wird dabei in drei Dimensionen dargestellt, den zwei Dimensionen der Fahrbahnebene und der Zeit. Durch eine diskrete Betrachtung können die Fahrzeugabmessungen und die Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Fahrzeuge berücksichtigt werden. Die Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des abbiegenden Fahrzeugs wurde durch Fahrversuche ermittelt.

Das Fahrerverhalten ist von den geometrischen Gegebenheiten der Kreuzung abhängig, deshalb wird das 3D-Fahrerverhaltensmodell an die aktuelle Kreuzung angepasst. Für die Anpassung wird ein aus der Computergrafik bekanntes Morphing-Verfahren benutzt, das die Verteilung Aufenthaltswahrscheinlichkeit anhand von Merkmalen verzerrt, die automatisiert aus den Fahrbahnbegrenzungen der aktuellen Kreuzung generiert werden. Bei einer direkten Durchfahrt durch die Kreuzung wird die aktuelle Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs ebenfalls berücksichtigt.

Die Linksabbiegeassistent wurde in Vorversuchen im Simulator getestet. Aus den Versuchsergebnissen werden Empfehlungen für zukünftige Versuche abgeleitet.

Die Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung sind bei der Linksabbiegeassistent hoch. Der Gegenverkehr kann mit der geforderten Genauigkeit und Reichweite mit zukünftigen Systemen zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation erfasst werden, die Fahrbahnbegrenzungen können in zukünftigen erweiterten digitalen Karten eingezeichnet werden.

6.2 Ausblick

Nachdem bereits Aktive Sicherheitssysteme für die häufigsten Unfalltypen, die zu schweren Personenschäden führen, Fahrunfälle und Unfälle im Längsverkehr, am Markt oder in Einführung sind, zeigt diese Arbeit, dass auch für den dritthäufigsten Unfalltyp, den Kreuzungsunfall, Aktive Sicherheitssysteme darstellbar sind.

Für zwei der vier wichtigsten Untertypen von Kreuzungsunfällen wurden Prototypsysteme entwickelt, der Stop-Schild-Assistent und die Linksabbiegeassistent. Die dabei entwickelten Verfahren zur Situationsinterpretation, besonders zur Fahrerverhaltensanalyse, können auf Aktive Sicher-

heitssysteme für die beiden anderen Untertypen, Rotlichtmissachtung und Einbiegen-/Kreuzen-Unfall, übertragen werden. Die Fahrerverhaltensanalyse des Stop-Schild-Assistenten eignet sich für Aktive Sicherheitssysteme, die eine Rotlichtmissachtung verhindern. Bei einem Aktiven Sicherheitssystem für Einbiegen/Kreuzen kann die Fahrerverhaltensanalyse des Stop-Schild-Assistenten zum Erkennen der Anhalteabsicht benutzt werden. Die Kollisionswahrscheinlichkeit beim Einbiegen/Kreuzen kann mit einer 3D-Betrachtung, ähnlich der der Linksabbiegeassistenten, berechnet werden.

Die Linksabbiegeassistenten wurde bisher nur für einen Kreuzungstyp realisiert. Die Methoden zum Erkennen von Abbiegeabsicht und Kollisionswahrscheinlichkeit sind auf andere Kreuzungstypen übertragbar, die entsprechenden Parameter müssen über weitere Fahrversuche gefunden werden.

Die Möglichkeit, die vorgestellten Aktiven Sicherheitssysteme in Serienprodukten umzusetzen, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Wesentlich sind dabei die in Kapitel 2.2.2 gezeigten kritischen Punkte bei der Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen:

- Die Verfügbarkeit von Systemen zur Fahrumgebungserfassung:
Die Anforderungen an die Fahrumgebungserfassung gehen bei den vorgestellten Aktiven Sicherheitssystemen über die Möglichkeiten einer bordautonomen Sensorik hinaus. Die vorgeschlagenen alternativen Systeme zur Fahrumgebungserfassung (siehe 4.4.4 und 5.6.4) sind nur auf der Basis entsprechender Industriestandards denkbar.
- Die Akzeptanz beim Kunden:
Die Entwicklung der Akzeptanz von Aktiven Sicherheitssystemen wird die Geschwindigkeit beeinflussen, mit der neue Systeme eingeführt werden. Dabei können die Akzeptanzgrenzen auf verschiedenen Regionen und Märkten stark voneinander abweichen.
- Das Klären offener Fragen zur Produkthaftung:
Bei der Produkthaftung bei Fahrerassistenzsystemen besteht erhebliche Rechtsunsicherheit (siehe 2.2.2.4). Die Einführung von Aktiven Sicherheitssystemen ist deshalb für einen Fahrzeughersteller ein schwer kalkulierbares Risiko.

Bei allen Punkten ist eine positive Entwicklung zu erwarten, die Aktive Sicherheitssysteme für Kreuzungen mit hoher Wahrscheinlichkeit möglich machen wird.

LITERATURVERZEICHNIS

ABBREVIATED INJURY SCALE

Abbreviated Injury Scale

[entnommen am 28.03.2006, URL: <http://www.fernoeducation.it/en/Abbreviated%20Injury%20Scale.pdf>]

AMENT, C.:

Grundlagen der Qualitätswissenschaft 7 – Spezielle Aspekte des QM
Bremen: Universität, Fachgebiet Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Umdruck zur Vorlesung Grundlagen der Qualitätswissenschaft 2006.

AMT FÜR AMTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN:

Weißbuch, die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft.
Köln: Bundesanzeiger 2001.

AMT FÜR AMTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN:

Panorama des Verkehrs. Statistische Überblick des Verkehrs in der Europäischen Union.
Ausgabe 2003
Luxemburg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften 2003.

APPEL, H., KRABEL, G., VETTER, D.:

Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion 2. Aufl.
Kippenheim: Verlag INFORMATION Ambs GmbH, 2002.

BANJERJEE, I., SHLADOVER, S. E., MISENER, J. A., CHAN, C.-Y., RAGLAND, D. R.:

Impact of Pedestrian Presence on Movement of Left-Turning Vehicles: Method, Preliminary Results & Possible Use in Intersection Decision Support.
Berkeley: University of California, 2004 [entnommen am 3.8.2006, URL: <http://repositories.cdlib.org/its/tsc/UCB-TSC-RR-2004-21>]

BEIER, T., SHAWN, N.:

Feature-Based Image Metamorphosis. In: Thomas, J. J. (Hrsg.): Proceedings of the 19st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1992
Reading: Addison-Wesley 1992, S. 35-42 (Computer Graphics 26)

BERNT, F.:

Development of a neural network for driver intention analysis for a stop-sign-violation warning-system.
München: TU, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Master Thesis, 2005.

BLERVAQUE, V., METZGER, K., BEUK, L., LOEWENAU, J.:

ADAS Horizon – How Digital Maps can Contribute to Road Safety. In: FISITA World Automotive Congress 2006.

Yokohama, Society of Automotive Engineers of Japan, 2006.

BOSCH GMBH:

BoschLive Archiv.

[entnommen am 5.1.2007, URL: http://www.bosch.de/start/content/language1/html/734_2880.htm]

ČAPKUN, S., HAMDI, M., HUBAUX, J.-P.:

GPS-free positioning in mobile ad hoc networks. In Cluster Computing, Vol. 5, Num. 2
New York: Springer 2002.

CHARWAT, H. J.:

Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation. 2. Aufl.

München: Oldenburg, 1994.

CHOVAN, J. D., TIJERINA, L., EVERSON, J. H., PIEROWICZ, J. A., HENDRICKS, D. L.:

Examination of Intersection Left Turn Across Path Crashes and Potential IVHS Countermeasures.

Washington: National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 808 154, 1994.

CITROËN AG:

Citroën AG – AFIL.

entnommen am 4.1.2007, URL: http://www.citroen.de/CWG/ueber_citroen/Innovation_und_Technik/technik_und_sicherheit/AFIL/

CORINO, N.:

Development of a driver intention analysis at intersection approach at left turning situations with neural networks.

München: TU, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Unveröffentlichte Diplomarbeit, 2005.

DAIMLERCHRYSLER:

DaimlerChrysler – Home – Konzernprofil – Geschichte – Distronic: Sicher und bequem auf Abstand.

[entnommen am 4.1.2007, URL: <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-73307-49-73597-1-0-0-73603-0-0-135-7155-0-0-0-0-0-0-0.html>]

DANNER, G.:

Lernende Vektorquantisierung (LVQ) und ihre Anwendung in der Bildverarbeitung
Mannheim, Universität, Lehrstuhl für Praktische Informatik IV, Umdruck zum Seminar „Bildverarbeitung und Neuronale Netze“, 1995.

DEPARTMENT OF DEFENCE:

2001 Federal Radionavigation Systems.
Springfield: National Technical Information Service,
DOT-VNTSC-RSPA-01-3.1/DOD-4650.5, 2001.

DONGES, E.:

Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 24, S. 98-112.
Darmstadt: Tetzlaff, 1978.

DORNHÖFER, S.M., PANNASCH, S.:

Risky business: Der Gefahr ins Auge geblickt.
Dresden: TU, Preisträgerbroschüre des zweiten Deutschen Studienpreises der Körber-Stiftung, 2000.

EHRENSPIEL, K.:

Integrierte Produktentwicklung.
Wien: Hanser, 1995.

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/enjoyhzeio/verkehrsuntersuchung/archiv/download/verkehrsuntersuchung28_de.pdf]

FASTENMEIER, W., GSTALTER, H.

INVENT-FVM AP1200 Fahraufgabenklassifikation, Abschlussbericht.
München: Mensch-Verkehr-Umwelt, Institut für Angewandte Psychologie, 2002.

FRITZSCHE, A. F.:

Wie sicher leben wir? Risikobeurteilung und –bewältigung in unserer Gesellschaft.
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1986.

GIDAS

GIDAS – German In-Depth Accident Study
[entnommen am 06.03.2006, URL: <http://www.gidas.org/>]

GSTALTER, H.:

Transport und Verkehr. In: Frey, D., Hoyos, C.G., Stahlberg, D. (Hrsg.): Angewandte Psychologie, Ein Lehrbuch,
München: Psychologie Verlags Union, 1988, S. 318-337.

HANCOCK, P.A., CAIRD, J.K., SHEKHAR, S.:

Factors Influencing Drivers' Left Turn Decisions. In: Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting.

Santa Monica: Human Factors Society, 1991, S. 1139-1143.

HANNAWALD, L.:

Unfallanalyse zur Entwicklung und Bewertung von Fahrerassistenzsystemen im Kreuzungsbereich, Bericht für das EU-Projekt PReVENT

Dresden: Technische Universität Dresden, 2005.

HEISSING, B.:

Dynamik der Straßenfahrzeuge

München: TU, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Umdruck zur Vorlesung Dynamik der Straßenfahrzeuge 2005.

HÖRAUF, U., BUSCHARDT, B.:

Analyse von Verkehrsunfällen mit FAS-Potentialeinschätzung am Beispiel des FAS Lane Departure Warning. In: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz.

München, TÜV-Süd, 2006.

INVENT

invent-online [home]

[entnommen am 24.03.2006, URL: <http://www.invent-online.de/>]

ISERMANN, R. (HRSG.):

Fahrdynamik-Regelung.

Wiesbaden: Vieweg, 2006.

JÄHNE, B.:

Digitale Bildverarbeitung. 3. Aufl.

Berlin: Springer, 1993.

JÜRGENSOHN, T., TIMPE, K.-P. (HRSG.):

Kraftfahrzeugführung.

Berlin: Springer, 2001.

KAUSSNER, A.:

Dynamische Szenarien in der Fahrsimulation.

Würzburg, Julius-Maximilians-Universität, Fakultät für Mathematik und Informatik, Dissertation, 2003.

-
- KLANNER, F.:
Analyse des Potentials von Satellitennavigation bei der Kreuzungsassistenz.
München, TU, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, unveröffentlichte Diplomarbeit, 2004 (Nr. 143).
- KOCHERSCHIED, H.:
Wege zur Effizienzbetrachtung von Fahrerassistenzsystemen. In: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz.
München: TÜV-Süd, 2004.
- KÖLBL, C., ZAHN, P.:
Entwicklung eines integrierten Quer- und Längsreglers zur Fahrzeugführung. In: 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik.
Aachen, RWTH, 2006.
- KOMPASS, K., HUBER, W.:
Advanced Driver Assistance – How Far Should They Go? In: FISITA World Automotive Congress 2006.
Yokohama, Society of Automotive Engineers of Japan, 2006.
- KÖNIG, W., MUTSCHLER, H.:
MMI of warning systems in Vehicles.
ISO/TC22/SC13/WG8, Technical Report, 2003.
- KOPF, M., FARID, M. N., STEINLE, J.:
Bausteine zur Entwicklung eines Systems der aktiven Sicherheit. In: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz.
München, TÜV-Süd, 2004.
- KOSCH, T.:
Den Horizont der Fahrerassistenz erweitern: Vorausschauende Systeme durch Ad-hoc Vernetzung. In: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz.
München, TÜV-Süd, 2004.
- KRATZER, K.:
Neuronale Netze, Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl.
Wien: Carl Hanser, 1993.
- KRUSE, R., GEBHARDT, J., KLAWONN, F.:
Fuzzy-Systeme. 2. Aufl.
Stuttgart: Teubner, 1995.

LAGES, U. S.:

Untersuchungen zur aktiven Unfallvermeidung von Kraftfahrzeugen.
Düsseldorf : VDI Verlag, 2001.

LAMERS, J. A.:

Ein bisschen Theorie.
[entnommen am 10.10.2006, URL: <http://www.dokutransdata.de/nsd2ltx/manual/node6.html>]

LEE, S.E., KNIPLING, R.R., DEHART, M.C., PEREZ, M.A., HOLBROOK, G.T., BROWN, S.B., STONE S.R., OLSON R.L.:

Vehicle-Based Countermeasures For Signal And Stop Sign Violations.
Blacksburg: Virginia Tech Transportation Institute, zugl. Washington: National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 809 716, 2004.

LLOYD, M., KIMBERLY, W., PIEROWICZ, J., GAWRON, V., BITTNER, A.C. JR.:

Using Driver Primary Control Input to Determine the Timing of Alerts and Warnings. In: Advances in Intelligent Transportation System Design.
Warrendale, SAE International, 1997.

MAN NUTZFAHRZEUGE AG (HRSG.):

Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik.
München: 2004. – Firmenschrift

MARKET MAKER

Gleitender Durchschnitt.
[entnommen am 07.04.2006, URL: <http://www.market-maker.de/08.Boerse/Lexikon/gd.html>]

MARTINUS, M.:

Funktionale Sicherheit von mechatronischen Systemen bei mobilen Arbeitsmaschinen.
Düsseldorf: VDI Verlag, 2005. (Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 586)
Zugl. München: TU, Dissertation 2005.

MATTERN, F.:

Allgegenwärtige und verschwindende Computer.
Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation (2005) 1, S. 29-36.

MEITINGER, K.-H.:

Konzeptionelle Entwicklungen für ein Minilab auf Basis der Inkjet-Technologie
München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, unveröffentlichte Semesterarbeit, 2001.
(Nr. 1927)

-
- MEITINGER, K.-H., EHMANN, 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)
- MEITINGER, K.-H., HEISSING, B., EHMANN, D.:
Linksabbiegeassistent. In: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz
München: TÜV-Süd, 2006.
- MENDE, R.:
Radarsysteme zur automatischen Abstandsregelung in Automobilen.
Braunschweig: Technische Universität, Dissertation 1999.
- MEYER, O., DIDIER, M.:
Driver Behaviour During Left-Turn – A Field and a Simulator Experiment. In: Quality of Work and Products in Enterprises of the Future.
Stuttgart, Ergonomics, 2003.
- NAUCK, D., KLAWONN, F., KRUSE, R.:
Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme.
Braunschweig: Vieweg, 1994.
- NEUNZIG, D.:
Fahrerassistenz auf dem Weg zur aktiven Unfallvermeidung.
Aachen: FKA, 2004. [entnommen am 27.10.2006, URL: http://www.pelops.de/pdf/2004/4ne0014_adas_aktive_unfallvermeidung.pdf]
- NOSZKO, T.:
Simulatorstudie zum Stoppschild-Assistenten. Ergebnisbericht.
Regensburg: Empirience Ergonomische Forschung und Beratung, unveröffentlichte Studie im Auftrag der BMW Group Forschung und Technik, 2005.
- NOVATEL:
Glossary of Terms: GPS Systems, GPS Navigation GPS Tracking Devices – NovAtel Inc.
[entnommen am 19.04.2006, URL: http://www.novatel.com/about_gps/glossary.htm]
- ÖAMTC:
Vergleichstest Käfer, Golf II und Golf IV.
[entnommen am 15.1.2007, URL: http://www.oeamtc.at/netautor/html_seiten/crashtest_kaefer_golf/kaefergolf_index.htm]

OTTE, D., NEHMZOW, J.

Codierungs-Katalog zur Dokumentation von Verkehrsunfällen.
Hannover: Medizinische Hochschule, Unfallchirurgische Klinik, 2002.

PRECHT, M. MEIER, N., TREMEL, D.:

EDV-Grundwissen. Eine Einführung in Theorie und Praxis der modernen EDV.
München: Addison-Wesley, 2004.

PREVENT:

PREVENT :: Home

[entnommen am 15.1.2008, URL: <http://www.prevent-ip.org/en/home.htm>]

REICHART, G.:

Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen
Düsseldorf: VDI Verlag, 2001.

RICHTLINIE FÜR LICHTSIGNALANLAGEN (RiLSA):

Ausgabe 1992

Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe
Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, 1998.

SCHALLER, K.-V.:

Nutzfahrzeugtechnik.

München: TU, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Umdruck zur Vorlesung
Nutzfahrzeugtechnik 2005.

SCHÄUFFELE, J., ZURAWKA, T.:

Automotive Software Engineering 2. Aufl.

Wiesbaden: Vieweg, 2004.

SCHEUCHENPFLUG, R., PIECHULLA, W., GREIN, M., KRÜGER, H.-P.:

Forschungsinitiative INVENT – FVM AP 1400 Abschlussbericht.

Würzburg: Institut für Verkehrswissenschaften WIVW, 2004.

SCHILLER, F.:

Industrielle Softwareentwicklung für Ingenieure.

München: TU, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, Umdruck zur
Vorlesung Industrielle Softwareentwicklung für Ingenieure 2006.

SCHLICKLING, M.:

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]

SCHMIDBAUER, W.:

Das Subjekt stärken? In: Zeitschrift Personalführung.

[entnommen am 11.10.2006, URL: http://www1.dgfp.com/dgfp/data/pages/DGFP_e.V/Produkte_-_Dienstleistungen/Zeitschrift_Personalfuehrung/Jahrgang_2006/Ausgabe_4_06/TH1_4_06.php]

SCHULZ, M.:

Vertiefung in die Positionsbestimmung mit GPS.

[entnommen am 15.1.2008, URL: http://www.geosoft-gps.de/gps_infos/GPS_Vertiefung.pdf]

SCHUTZRECHT EP 1556264 B1

European Patent Specification (2007-01-24). TRW Limited. PR.: GB0225192 2002-10-30. – Courtenay, William John Andres, Tucker, Mark Richard. Video Enhanced Stability Control In Road Vehicles

SCHUTZRECHT WO 95/06304 A1

International Application (1994-08-25). Friedmann Mark, Yehouda, Halevi. PR.: IL106802 1993-08-25. – Lulu, Ben. Vehicle Stop Warning System.

SEEK, A., GASSER, M.:

Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS. In: Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München: TÜV-Süd, 2006.

SHLADOVER, S. E., RAGLAND, D., CHAN, C.-Y., MARCO, D.:

Measuring Intersection Turning Behaviour to Support Design of an Intersection Collision Warning System. In: Proceedings of the 2004 IEEE Intelligent Transportation System Conference. Nagoya: IEEE, 2004

SIMON, M.-C., PAGE, Y., CHAUVEL, C., STANZEL, M.:

Identification of the Most Frequent Accident Scenarios at Junctions: A Tool for Inferring the Right Counter-Measures. In: FISITA World Automotive Congress 2006. Yokohama, Society of Automotive Engineers of Japan, 2006.

SPIEGEL INSTITUT:

Marktstudie Sicherheitssysteme Deutschland – Kennen Autofahrer ihre Schutzengel?
Mannheim: Spiegel-Institut, 2003 [entnommen am 2.1.2007, URL: http://www.voice-control.de/files/si_sicherheitssysteme.pdf].

STATISTISCHES BUNDESAMT:

Verkehrsunfälle 2001
Stuttgart: Metzler-Poeschel, 2002.

STATISTISCHES BUNDESAMT:

Verkehrsunfälle 2005
Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2006.

STEININGER, U., RAU, M., SCHICK, B.:

Fahrerassistenzsysteme im Spannungsfeld zwischen Nutzen und Risiken. In: Tagung
Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz
München: TÜV-Süd 2006

TINGVALL, C., KRAFFT, M., KULLGREN, A., LIE, A.:

The Effectiveness of ESP in reducing Real Life Accidents. In: Proceedings 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles
Nagoya: Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, 2003.

T-MOBILE (HRSG.):

Bedienungsanleitung T-Mobile NaviGate für Series60 Endgeräte. Version 2.2.
Bonn: 2004 – Firmenschrift.

ÜBEREINKOMMEN ÜBER DEN STRASSENVERKEHR:

Wien: 1968 – Internationales Übereinkommen.
[entnommen am 12.10.2006, URL: http://www.admin.ch/ch/d/sr/0_741_10/index.html]

UNFALLFORENSIK:

Ua-Vermeidbarkeit
[entnommen am 16.5.2006, URL: <http://www.unfallforensik.de/ua-vermeidbarkeit.html>]

VOLKSWAGEN AG:

Forschungsinitiative INVENT Schlussbericht FAS.
Wolfsburg: Volkswagen AG, 2006.
[entnommen am 23.2.2007, URL: http://www.volkswagen-environment.de/_download/Schlussbericht_INVENT-FAS_Volkswagen-AG.pdf]

WEBER, T.:

Durch ESP® jährlich über 20000 schwere Unfälle weniger.
Berlin: DaimlerChrysler AG, 2004 – Pressemeldung vom 17.11.2004.

-
- WEILKES, M.:
Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation
Aachen, RWTH, Institut für Kraftfahrwesen, 2000.
- WILTSCHKO, T.:
Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung
der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004. (VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 570)
Zugl. Stuttgart: Universität, Dissertation 2004.
- WALLENTOWITZ, H.:
Vertikal-/ Querdynamik von Kraftfahrzeugen
Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbH, 2002
- WIKIPEDIA (2006A)
Mechatronik – Wikipedia, the free encyclopedia.
[entnommen am 22.3.2006, URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mechatronik>]
- WIKIPEDIA (2006B)
V-Modell – Wikipedia
[entnommen am 20.4.2006, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/V-Modell>]
- WIKIPEDIA (2006C)
Voxel – Wikipedia
[entnommen am 02.03.2006, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Voxel>]
- ZABYSHNY, A., RAGLAND, D.R.:
False Alarms and Human-Machine Warning Systems.
Berkeley: U.C. Berkeley Traffic Safety Center, Paper UCB-TSC-RR-2003-07.
[entnommen am 23.02.2007, URL: <http://repositories.cdlib.org/its/tsc/UCB-TSC-RR-2003-07/>]
- ZIEMS, D.:
Zur psychologischen Akzeptanz von Sicherheits- und Fahrerassistenzsystemen. In:
Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004. (VDI-Berichte 1864)
- ZOBEL, R.:
Bewertung der Wirksamkeit von Maßnahmen der aktiven und passiven Sicherheit. In: 15.
Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik.
Aachen, RWTH, 2006.