

Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - „Konsumierbare“ oder echte Verbesserungen?

H.-H. Braess, E. Donges

1. Einleitung

Schon seit langem werden unter „aktiver Sicherheit“ von Automobilen alle Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen oder zur Reduktion der Unfallschwere verstanden (z.B. [1,2]). Deren Wirksamkeit setzt vor allem voraus, dass (nach [3]):

- die für die Unfallentstehung relevanten Faktoren in der Beziehung Fahrer-Fahrzeug- Fahrumgebung hinreichend bekannt und einer Gestaltung zugänglich sind,
- und die getroffenen Maßnahmen in ihrem Effekt nicht durch ein verändertes Fahrer- oder Fahrzeugverhalten kompensiert werden.

Auf den fahrerbezogenen Teil des zweiten Punktes hat E. Fiala schon in den 60er Jahren hingewiesen: Ein Fahrer könnte möglicherweise im Wissen um die hohe aktive Sicherheit seines Fahrzeugs dieses Potential ganz oder teilweise durch unangepasste Fahrweise kompensieren oder „konsumieren“. Diesen Gedanken hat Wilde im Jahre 1982 unter dem Begriff „Risiko-Homeostase“ (häufig Risiko-Kompensation genannt) aufgegriffen [4], was zu intensiven Diskussionen und weiteren Konzepten geführt hat (z.B. [5-7]). Klebelsberg hat in ähnlicher Weise die Differenzierung in objektive und subjektive Sicherheit vorgeschlagen [8]. Zudem wird höhere Risikobereitschaft als Teil des aggressiven Fahrens angesehen [9-11].

Solche Überlegungen erlangen in jüngster Zeit besondere Bedeutung, seitdem in zunehmendem Maße sog. Fahrerassistenz-Systeme entwickelt und eingesetzt werden (aus der umfangreichen Literatur z.B. [12,13]). So schreibt beispielsweise Timpe [13]: „Mit jedem neuen Assistenzsystem wird somit dem Fahrer die Möglichkeit nahegelegt, sein Fahrverhalten so zu ändern, dass die neuen, mit dem Assistenzsystem gegebenen Möglichkeiten der Fahrzeugführung ausgeschöpft werden“.

Allen Überlegungen, die unter Stichworten wie „Konsumierbarkeit von aktiver Sicherheit“, „Risiko-Homeostase“ oder „individuell invarianter Abstand zwischen subjektiver und objektiver Sicherheit“ dargestellt werden, ist eine Sorge gemeinsam: Technologische Maßnahmen zur Erhöhung der objektiven Sicherheitsreserven könnten möglicherweise durch eine daraus resultierende Verstärkung des subjektiven Sicherheitsgefühls aufgezehrt werden. Das würde bedeuten: Ein mit dem Ziel einer verbesserten aktiven Sicherheit investierter technologischer und volkswirtschaftlicher Aufwand wäre sinnlos.

Die vorliegende Arbeit versucht, dieser Fragestellung genauer nachzugehen.

2. Grundsatzüberlegungen zur Frage der Konsumierbarkeit

Die klassische Gliederung der Aktiven Sicherheit von Wilfert [1] in die vier Teilgebiete

- Fahrsicherheit
- Konditionssicherheit
- Wahrnehmungssicherheit
- Bedienungssicherheit

weist schon von der Namensgebung her auf die Leistungsumfänge und die Befindlichkeit des Fahrers als verantwortlichem Glied im System Fahrer-Fahrzeug-Straße hin. Dabei geht es grundsätzlich um die Schaffung bestmöglicher technischer Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche und sichere Teilnahme am Straßenverkehr. Jede technische Maßnahme zur Verbesserung der Aktiven Sicherheit muss sich jedoch die Frage gefallen lassen, ob sie durch ihre Funktionsweise und das von ihr ausgelöste subjektive Erleben des Fahrers möglicherweise zugleich Ursachen dafür liefert, dass ihre sicherheitsfördernden Merkmale durch riskanteres Verhalten des Fahrers konsumiert werden. Potentielle Ursachen für die Konsumierung von Sicherheitsreserven durch den Fahrer können sein:

- Überschätzung des eigenen Fahrkönnens
- Überschätzung der dynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges
- Überschätzung der Leistungsfähigkeit von evt. vorhandenen Assistenzsystemen
- Fehleinschätzung der Umweltbedingungen (Fahrbahngriffigkeit, Straßenverlauf, Sichtweite, Abstände zu festen oder beweglichen Objekten ...)

Die mangelnde Sensibilisierung für potentielle Gefahren [14] ist Gegenstand eines neuen Forschungsansatzes unter dem Thema „Situationsbewusstsein“ (situation awareness) [15-17].

Als Beispiele für entsprechend erhöhte Risikobereitschaft seien angeführt:

- Zu hohes Geschwindigkeitsniveau
- Zu hohe Längs- und Querschleunigungen
- Zu kleine „sichere Räume“ um das Fahrzeug herum (Abstände, Relativgeschwindigkeiten, Zeitlücken, ...)
- Zu hohe Überhol-Risiken
- Missachtung von Warnungen aller Art

2.1. Erörterungen zur Unfalldisposition im Straßenverkehr

Anhand von Bild 1 sollen einige Grundsatzüberlegungen zur Unfalldisposition des Systems Fahrer-Fahrzeug-Verkehrssituation dargelegt werden.

Das Bild 1 zeigt in vereinfachter Form einen qualitativen Zusammenhang zwischen der Unfallhäufigkeit (z. B. gemessen in Anzahl der Unfälle bezogen auf die Gesamtfahrleistung) und der Fahr- und Verkehrskompetenz der Fahrerpopulation in der Gestalt einer badewannenförmigen Kurve. Diese Badewannenkurve setzt sich aus drei Zonen zusammen.

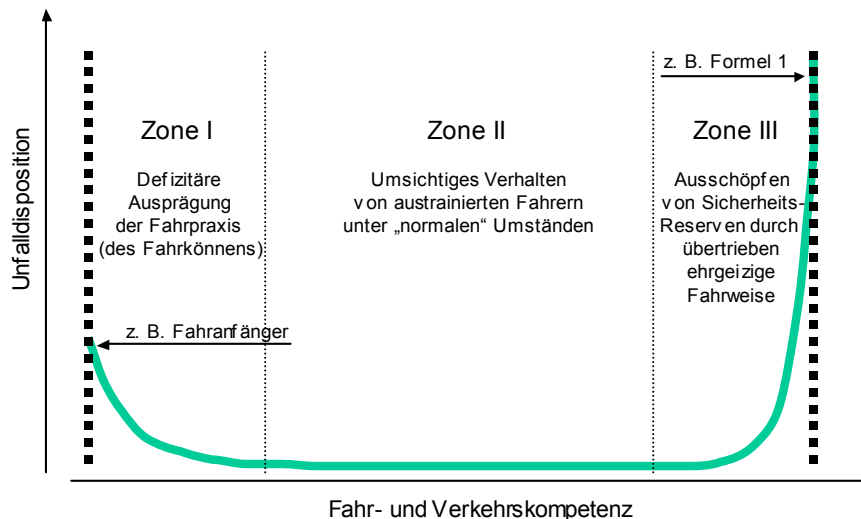


Bild 1. Unfalldisposition zwischen mangelndem Leistungsvermögen und Ausschöpfung aller Reserven

Die Zonen I und II seien dadurch gekennzeichnet, dass die jeweiligen Fahrer gemessen an ihrem Fahrkönnen sich nur eine „normale“ Risikoexposition zumuten.

Zone I beginnt an der gepunkteten linken Grenzlinie mit der überdurchschnittlich hohen Unfallbeteiligung von Fahranfängern infolge ihrer zunächst defizitären Fahrpraxis. Die wohl erstmaligen Untersuchungen von Munsch [18] zeigen eine 7-jährige Lernphase auf, bevor der Fahranfänger „schließlich, nach annähernd 100.000 km Fahrleistung, die normale Häufigkeit menschlichen Versagens“ erreicht. Neuere Untersuchungen, z. B. [19], erstrecken sich auf einen Beobachtungszeitraum von 4 Jahren und weisen eine vom Zeitpunkt des Fahrerlaubnisserwerbs mit der Zeit exponentiell abfallende Unfallrate auf, die mit wachsender Fahrkompetenz asymptotisch gegen den Grenzwert einer „normalen“ Unfallhäufigkeit geht (Faktor etwa 5:1).

Zone II zeigt einen breiten Bereich annähernd konstanter, niedriger Unfallbeteiligung auf. Sie ist charakterisiert durch umsichtiges Verhalten von austrainierten Fahrern unter „normalen“ Umständen. Den Autoren sind keine Untersuchungsergebnisse bekannt, die eine differenzierte Betrachtung dieser Zone im Sinne des vorliegenden Themas beinhalten.

In Zone III kommt nun ein wesentlich neues Verhaltensmerkmal hinzu: Aus welchen Gründen auch immer (z. B. Zeitdruck, Wettbewerbsdruck, Ehrgeiz, freie Entscheidung) überschreitet der Fahrer sein gewohntes Fahrverhaltensrepertoire und schöpft alle Sicherheitsreserven aus mit der Folge, dass die Unfallhäufigkeit extrem anwächst. Als Beleg für diese These dient die Auswertung der Unfallhäufigkeit in den Formel 1-Rennen des Jahres 2005: 22 Unfälle auf rund 95.000 km Gesamtfahrstrecke. Das bedeutet eine Erhöhung um einen Faktor von mehr als 70 gegenüber der durchschnittlichen Unfallrate im Straßenverkehr in Deutschland im Jahr 2004 (3.244 polizeilich erfasste Unfälle pro 1 Mrd. Kfz-km [20]). Dieses Ergebnis aus der Formel 1 dient hier als Beispiel für die Leistungsgrenze des Systems Fahrer-Fahrzeug-Straße, die im Bild 1 durch die rechte gepunktete Grenzlinie dargestellt ist.

2.2. Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme

Anhand einiger zusätzlicher Anmerkungen zu der Badewannenkurve in Bild 1 lassen sich erste Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme ableiten.

Zone I:

Der Fahranfänger ist gezwungen, im normalen Straßenverkehr „mitschwimmen“, eine Situation, die ihn aufgrund seiner noch unausgereiften Fahrkompetenz häufiger überfordert als die große Mehrheit der austrainierten Fahrer.

Zur Ausweitung der Fahrpraxis von Fahranfängern während der Fahrausbildung bildet sich seit den 90-er Jahren in verschiedenen Ländern Europas die Praxis des sog. „Begleiteten Fahrens mit 17“ heraus. Bisher vorliegende Ergebnisse aus Großzahluntersuchungen in Schweden und während des laufenden niedersächsischen Modellversuch „Führerschein mit 17 – Begleitetes Fahren“ [21] zeigen: Wer schon mit 17 Jahren in Begleitung der Eltern Auto fahren lernt, erlebt während der Begleitphase fahrleistungsbezogen eine um den Faktor 10 verringerte Unfallhäufigkeit und verursacht später rund 40% weniger Unfälle als andere Fahranfänger. Die Art der Unterstützung vonseiten der Begleitpersonen ist im Wesentlichen verbale Information und/oder Handlungsempfehlung, wie sie in etwa auch durch Warnsysteme gegeben werden kann. Dafür muss das Assistenzsystem folgende Qualitäten aufweisen:

- **Fahrerassistenzsysteme müssen bezüglich ihres jeweils spezifischen Funktionsbereichs ein ähnlich hohes Situationswissen entwickeln wie durchschnittlich trainierte Fahrer (die begleitenden Eltern).**
- **Die Art der Einflussnahme vonseiten des Assistenzsystems muss für den Fahrer ähnlich vertrauenswürdig sein wie die der begleitenden Eltern.**

Zone II:

Im breiten Band der Zone II mit der Population der austrainierten Fahrer ist durchaus ein großes Spektrum an Fahrkompetenz vertreten, vom sehr zurückhaltenden, vorsichtigen bis zum sehr ambitionierten, professionellen, grenzbereichserfahrenen Fahrer. Korrespondierend zum individuellen Umfang des jeweils eintrainierten Fahrverhaltensrepertoires wird der einzelne, sicherheitsbewusste Fahrer in allen von ihm kontrollierbaren Fahrsituationen das Maß der vorhersehbaren dynamischen Anforderungen so wählen, dass sein eigener Erfahrungshorizont nicht überschritten wird. Solange das Anforderungsprofil der jeweiligen Verkehrssituation eine Untermenge des eintrainierten Verhaltensrepertoires ist, existiert eine Sicherheitsreserve, die eine erfolgreiche Bewältigung der Situation möglich macht.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass vorliegende Messungen und Beobachtungen zu Fahrerhaltenskollektiven auf trockenen Straßen einen deutlichen Abstand zur Kraftschlussgrenze zeigen [22], [23], [24]. Das kann als Indiz dafür gelten, dass einerseits hohe Quer- oder Längsbeschleunigungen nicht dem vom Gros der Fahrer auf Dauer gewünschten Bewegungszustand entsprechen (Stichwort: Wohlbefinden). Andererseits führt eine technisch darstellbare Erweiterung des Kraftschlusspotentials nicht automatisch zu einer Erhöhung der permanent ausgenutzten Beschleunigungsbereiche und bedeutet damit nicht ohne weiteres eine Erweiterung von Sicherheitsreserven.

Zone III:

Das Beispiel der extrem hohen Unfallbelastung im Formel 1-Rennsport zeigt, dass die eingangs beschriebene Problematik der Konsumierbarkeit von aktiver Sicherheit ein real existierendes Problem darstellt. Trotz extrem günstiger Voraussetzungen wie

- Absolut hervorragend trainierte Fahrer
- Extrem gute Streckenkenntnis der Fahrer
- Absolut hohe Vigilanz der Fahrer
- Fahrer mit hervorragenden körperlichen/gesundheitlichen Voraussetzungen
- Geringe Verkehrsdichte (20 Fahrzeuge auf 4 bis 5 km Streckenlänge)
- Alle Fahrzeuge mit gleicher Fahrtrichtung
- Fahrbahnoberfläche in hervorragender Qualität
- Fahrzeuge mit sehr hohem Kraftschlusspotential

stellt sich eine extrem hohe Unfallbelastung ein. Sogar das auf trockener Straße wesentlich erhöhte Kraftschlusspotential, das mithilfe der entsprechenden Reifentechnologie und aerodynamischen Maßnahmen erreicht wird, schützt die Formel 1-Fahrer nicht vor dem starken Anwachsen der Unfallhäufigkeit. Dafür sind zwei Gründe zu nennen, die das hohe Sicherheitspotential konsumieren und ins Gegenteil verkehren:

- Fahren an der Grenze des eigenen Fahrkönnens
- Fahren an der physikalischen Grenze (Kraftschlussgrenze)

Aus dieser Beobachtung sind folgende zusätzlichen Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme abzuleiten:

- **Fahrerassistenzsysteme müssen helfen, dass eine Sicherheitsreserve bis zur Grenze des eigenen Fahrkönnens (Driver Experience Envelope) erhalten bleibt.**
- **Fahrerassistenzsysteme müssen helfen, dass eine Sicherheitsreserve bis zur Kraftschlussgrenze erhalten bleibt.**

Wenn Kraftschlusspotential und eigenes Fahrkönnen bis zur Grenze ausgenutzt werden, wird Fahrsicherheit konsumiert.

3. Fahrerverhalten und Unfallrisiko

3.1. Hierarchie der Fahrzeugführungsaufgabe und Kategorien des menschlichen Reaktionsverhaltens

Zur Einordnung der Fahrzeugführungsaufgabe in den Gesamtkontext zielgerichteten menschlichen Verhaltens wird im Bild 2 auf die Verhaltenskategorien von Rasmussen [25] und die Hierarchie der Fahraufgabe zurückgegriffen, wie es schon ausführlicher in [26], [14] und [3] zu finden ist.

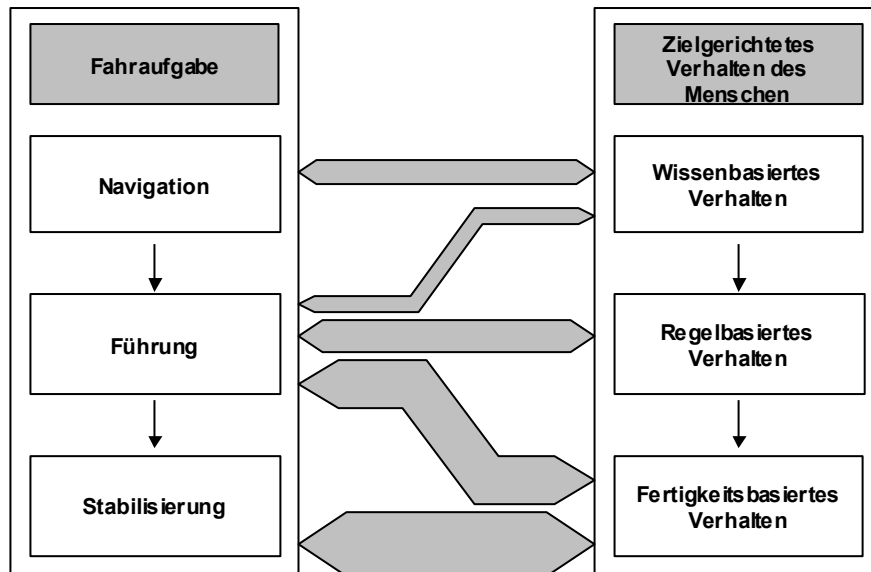


Bild 2. Hierarchie der Fahrzeugführungsaufgabe und Kategorien des menschlichen Reaktionsverhaltens nach [26]

Die **Navigation**s-aufgabe umfasst die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute aus dem zur Verfügung stehenden Straßennetz sowie eine Abschätzung des voraussichtlichen Zeitbedarfs. In einem bisher unbekanntem Verkehrsraum gehört sie in vollem Umfang zum **wissensbasierten** Verhalten und erfordert kognitiven Aufwand. In einem vertrauten Verkehrsraum dagegen kann die Navigationsaufgabe als bereits erfüllt angesehen werden. Typisch für die Navigationsebene ist die örtlich punktuelle bzw. zeitlich diskrete Aufgabenerfüllung durch den Fahrer.

Der kontinuierliche Prozess des Fahrens spielt sich auf den Aufgabenebenen **Führung** und **Stabilisierung** ab. Die Führungsaufgabe besteht im Kern darin, aus der vorausschauenden Wahrnehmung der Verkehrssituation die Führungsgrößen wie Sollspur und Sollgeschwindigkeit abzuleiten und antizipatorisch im Sinn einer Steuerung (open loop control) einzugreifen, um günstige Vorbedingungen für die Bewältigung einer potentiell kritischen Situation zu schaffen. Im Hinblick auf das Problem der Konsumierung von aktiver Sicherheit liegt hier der Schlüssel, nämlich **ob die gewählten Führungsgrößen im objektiv sicheren oder unsicheren Bereich liegen** [27],[26],[3].

Die Stabilisierungsaufgabe beinhaltet im Sinn eines geschlossenen Regelkreises (closed loop control) die Kompensation von Regelabweichungen zwischen Führungs- und Istgrößen.

Nach Abschluss der Lernphase kann dieser kontinuierliche Prozess von Führung und Stabilisierung als unbewusstes, subkortikales Verhalten weitgehend den **regel-** und **fertigkeitsbasierten** Verhaltensebenen zugeordnet werden, zumindest solange die Fahrt ungestört verläuft. Erst kritische Situationen oder Verkehrskonflikte, die außerhalb des bisher erlernten Verhaltensrepertoires liegen, zwingen den Fahrer, in die wissensbasierte Verhaltensebene zu wechseln. Das dann notwendige mentale Durchspielen von Handlungsalternativen ist zeitaufwendig und muss immer dann als

unfallträchtig angesehen werden, wenn Fahrgeschwindigkeit und Abstand zur Gefahrenstelle dazu nicht genügend Zeit lassen. Aus diesem Grund hat schon Förster immer wieder gefordert (z.B. [28]): „ Im Straßenverkehr ist der Bedarf für bewusstes Handeln zu minimieren!“

Die in Bild1, Zone I dargestellte, anfänglich sehr hohe und dann deutlich abfallende Unfallbeteiligung des Fahranfängers hat damit zu tun, dass er sich zunächst ganz in der wissensbasierten Verhaltensebene bewegt und erst nach und nach sein regel- und fertigkeitbasiertes Verhaltensrepertoire erlernt.

3.2. Neuer Ansatz zur Quantifizierung von fertigungs-, regel- und wissensbasiertem Verhalten im Straßenverkehr

Über die verbale Beschreibung hinaus soll nun hier ein neuer Ansatz zur Annäherung an eine Quantifizierung der Begriffe fertigungs-, regel- und wissensbasiertes Verhalten im Straßenverkehr eingeführt werden. Angeregt wurde dieser Vorschlag durch die messtechnische Erfassung von Fahrverhaltenskollektiven, die bisher in der Fachliteratur nur selten dokumentiert worden sind [22], [23], [24].

Zur Erläuterung dieses Ansatzes soll als Beispiel Bild 3 aus [24] dienen.

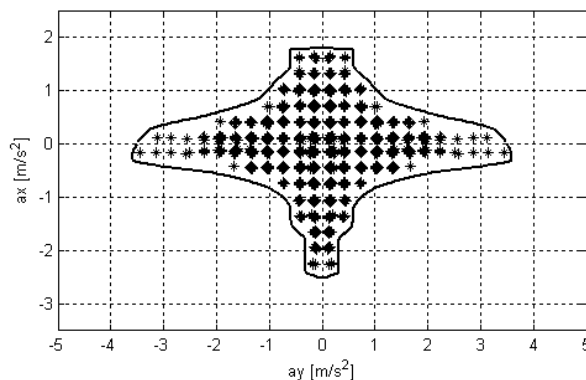


Bild 3. g-g-Diagramm des Fahrertyps „normal“ [24]

Dieses Diagramm zeigt den Bereich von Quer- und Längsbeschleunigungen, die zwölf Fahrer vom Fahrertyp „normal“ während jeweils ca. zweieinhalbstündiger Fahrten im öffentlichen Verkehr auf einer Versuchsstrecke mit kurvigen Landstraßen und Autobahnen genutzt haben. Die einhüllende Linie stellt dabei eine 85-Perzentil-Linie dar, d. h. alle Fahrer blieben in 85 % der Fahrzeit unterhalb dieser Hüllkurve.

Dieses Bild soll nun dazu dienen, in einem pragmatischen Ansatz zu definieren:

- Der fertigkeitbasierte Bereich umfasst die 80-Perzentil-Einhüllende des Längs- und Quereschleunigungskollektivs eines individuellen Fahrers,
- der regelbasierte Bereich reicht bis zum 95. Perzentil und
- die darüber hinausgehenden Fahrzustände als seltene Ereignisse sind vor allem dem wissensbasierten Bereich zuzuordnen.

(Die Zahlenwerte 80. und 95. Perzentil, die nicht im Bild gezeigt sind, sind als willkürlich gewählte Anhaltswerte zu verstehen, die gegebenenfalls experimentell genauer abzusichern sind.)

Für unterschiedliche Fahrertypen wird der jeweils individuelle Erfahrungshorizont vom eher kleinen Umfang beim zurückhaltenden, vorsichtigen Fahrer bis zum sehr ausgedehnten Fahrverhaltensrepertoire beim sportlich ambitionierten, dynamischen Fahrer reichen, Bild 4. Die bisher bekannten Messungen zeigen durchgängig, dass auf trockener Fahrbahn die entsprechenden Fahrverhaltenskollektive im Verkehr auf öffentlichen Straßen deutlich unterhalb der Kraftschlussgrenze (Kammischer Kreis) bleiben.

Wenn allerdings Witterungsverhältnisse wie Fahrbahnnässe, Schnee oder Eis das Kraftschlusspotential erheblich vermindern, kann es dahin kommen, dass selbst das schmale Fahrverhaltenskollektiv des vorsichtigen Fahrers die Grenze des Kammschen Kreises überschreitet, und das Unfallrisiko unter diesen Umständen erheblich ansteigen kann, Bild 4.

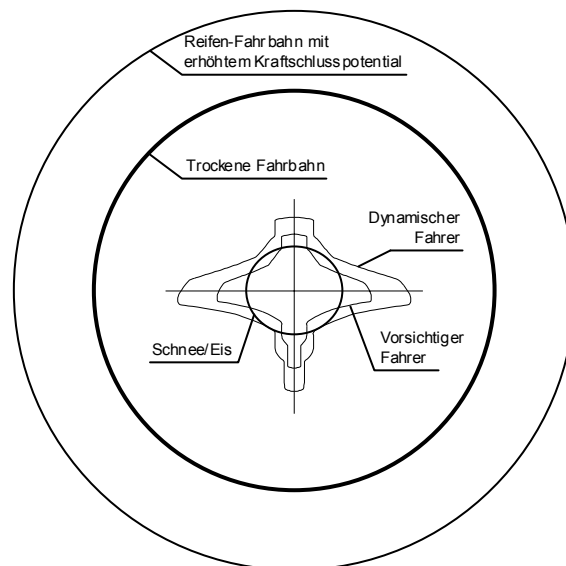


Bild 4. Fahrverhaltenskollektive und Kraftschlussgrenze

- Unterschiedliche Fahrertypen
- Veränderte Kraftschlussgrenzen

Im Umkehrschluss bedeutet ein deutlich erhöhtes Kraftschlusspotential, wie es durch Neuentwicklungen im Bereich der Reifentechnologie oder der Fahrbahnoberflächen vorstellbar ist, nicht durchgängig, dass dadurch automatisch ein geringeres Unfallrisiko zu erwarten wäre, weil der Erfahrungshorizont der Fahrerpopulation insgesamt aus Gründen des eigenen Wohlbefindens sich kaum erweitern würde.

Auch intraindividuell kann der Fahrstil des Fahrers je nach Gemütslage in seiner Spannweite von defensiv (innerhalb der 80-Perzentil-Einhüllenden) über offensiv (innerhalb der 95-Perzentil-Einhüllenden) bis aggressiv (die 95-Perzentil-Einhüllende überschreitend) variieren.

3.3. Zeitkriterien

Nachdem bisher anhand der Fahrverhaltenskollektive in den Bildern 3 und 4 die Amplitudenseite der Fahrdynamik betrachtet wurde, soll nun als zweiter, ebenso wichtiger Aspekt das Zeitverhalten erörtert werden. Einen ersten Eindruck über die Zeithorizonte, die die drei Ebenen der Fahraufgabe charakterisieren, gibt Bild 5.

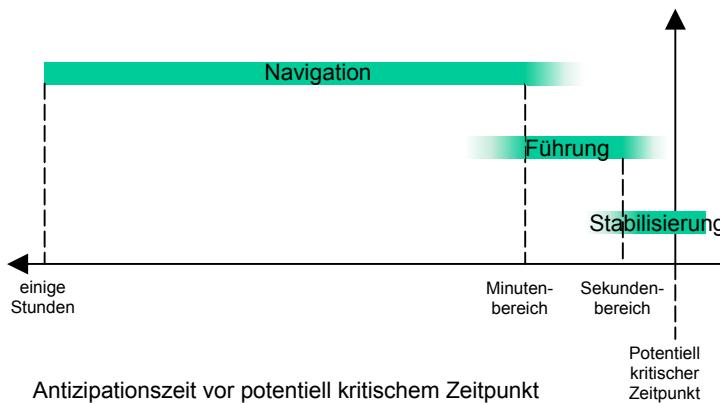


Bild 5. Typische Zeithorizonte der Navigations-, Führungs- und Stabilisierungsaufgabe

Der typische Zeithorizont der Navigationsebene erstreckt sich von der möglichen Gesamtdauer einer Fahrt im Bereich einiger Stunden bis in die Region der Ankündigung bevorstehender Streckenänderungen im Minutenbereich. Dann setzt als wesentlicher Teil der Führungsaufgabe unter günstigen Sichtverhältnissen bereits die optische Wahrnehmung der Straßengeometrie mit der Ableitung der Führungsgrößen und der antizipatorischen Einleitung von Stelleingriffen ein. Typische Antizipationszeiten für Lenkeingriffe liegen nach [29] im Sekundenbereich. Geschwindigkeitskorrekturen durch Lastwechsel oder Bremsbetätigung setzen üblicherweise deutlich früher ein als Lenkaktionen. Typische Stelleingriffe zur Kompensation von Regelabweichungen auf der Stabilisierungsebene liegen im Bereich einiger 100 ms, wobei typische Fahrertotzeiten im geschlossenen Regelkreis eine Größenordnung von einer halben Sekunde kaum unterschreiten [29].

Taktzeiten im ms-Bereich können deshalb nur durch technische Regelsysteme dargestellt werden. Reaktionszeiten auf unerwartete Ereignisse liegen im Bereich von etwa 2 bis 3 s, je nach Komplexität der Situation möglicherweise deutlich darüber. D. h. Informationssysteme oder Warnsysteme, die eine kognitive Verarbeitung erfordern, sollten eine Antizipationszeit von 2 bis 3 s möglichst überschreiten. Wenn das nicht realisierbar ist (z. B. aufgrund der begrenzten Reichweite von Umfeldsensoren), kann nur eine spontan angeregte Reaktion durch eine intuitiv wirkende Handlungsempfehlung, z. B. in Form einer haptischen Anzeige wie beim Aktiven Fahrpedal oder Lenkrad, helfen.

Wie wichtig frühzeitige Aktionen/Reaktionen des Fahrers für die Unfallvermeidung sind, hat Enke abgeschätzt [30]: Etwa die Hälfte aller Kollisionsunfälle könnten durch Vorverlegung der Fahrerreaktion um cirka 1 Sekunde vermieden werden. Einer neueren Arbeit entsprechend müssen Warnsignale für Spurwechselentscheidungen spätestens 2 Sekunden vorher gegeben werden [31].

3.4. Fehlerbaum als Modellvorstellung für die Vermeidung von Unfällen

Im Bild 6 ist eine Fehlerbaumdarstellung aus [14] übernommen, die eine mögliche Übersicht über das komplexe Ursachengefüge bei der Entstehung eines Unfalls aufzeigt. Der Unfall als zu vermeidendes Top Event (Ebene 1 des Fehlerbaums) entsteht, wenn ein Verkehrskonflikt eintritt und zugleich die Vermeidungsaktion des Fahrers misslingt (UND-Gatter zwischen den Ebenen 1 und 2).

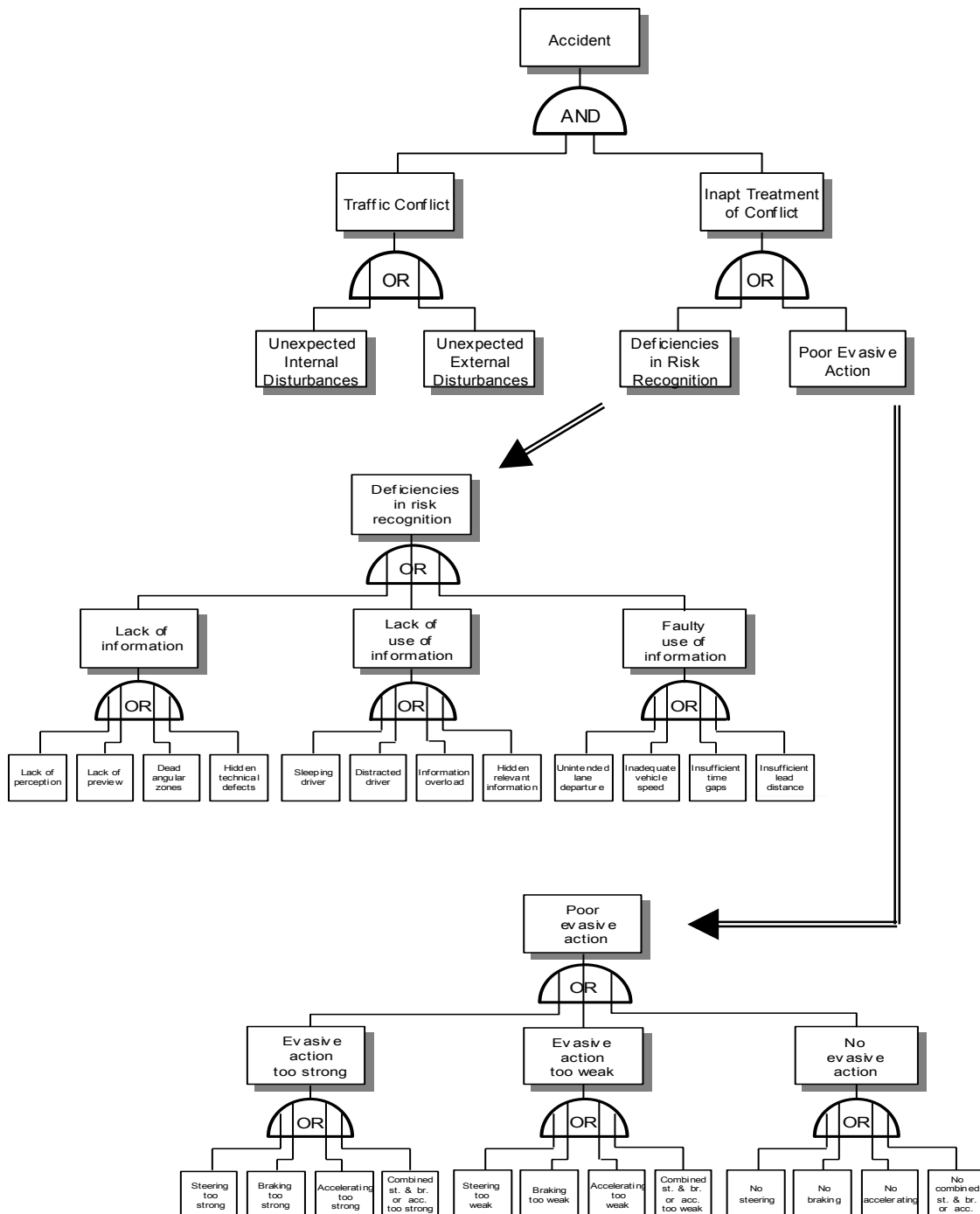


Bild 6. Fehlerbaum zur Unfallentstehung nach [14]

Die Verbindung zu den vorhergehenden Erörterungen besteht darin, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass dem Fahrer das Auffinden einer geeigneten Vermeidungsaktion misslingt, um so stärker ansteigt, je mehr die spezifischen Anforderungen des eingetretenen Verkehrskonfliktes das erlernte Verhaltensrepertoire des Fahrers übersteigen.

Zur weiteren Vertiefung wird nur der rechte Hauptzweig des Fehlerbaums „Unangemessene Behandlung des Konflikts“ aus Ebene 2 bis herunter in Ebene 5 detailliert. Als Ursachencluster für das Misslingen der Konfliktlösung wird in Ebene 3 zwischen „Mängeln bei der Risikowahrnehmung“ (vgl. Wahrnehmungssicherheit in [1]) und „Mängeln bei der Vermeidungsaktion“ (vgl. Bedienungssicherheit in [1]) unterschieden. Die Mängel bei der Risikowahrnehmung werden in Anlehnung an [32] in „Objektives Fehlen von Information“, „Nichtnutzen objektiv vorhandener Information“ und „Falsches Nutzen objektiv vorhandener Information“ strukturiert. Bezüglich der Mängel auf der Reaktionsseite erfolgt auf Ebene 4 ähnlich der Differenzierung in „Ausführungsfehler“ und „Auslassungsfehler“ in [33] eine Untergliederung in die Kategorien „Reaktion zu stark“, „Reaktion zu schwach“ und „keine Reaktion“. Diese drei Fälle führen in Ebene 5 jeweils zu den Stellmöglichkeiten des Fahrers: Lenken, Bremsen, Gasgeben und kombiniertes Lenken und Bremsen bzw. Lenken und Gasgeben.

Fahrerassistenzsysteme können in jeder Ebene dieses Ursachengefüges zur Verringerung des Unfallrisikos beitragen, wenn sie es schaffen, den einen oder anderen Eingangszweig eines ODER-Gatters durch ein zusätzlich eingefügtes UND-Gatter zu verriegeln (siehe z. B. Bild 8).

4. Fahrerassistenzsysteme

Wesentliche Grundlagen für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen wurden in den Forschungsprogrammen PROMETHEUS [34], MOTIV [12] und INVENT [35] erarbeitet. Im [Bild 7](#) wird eine Klasseneinteilung der Fahrerassistenzsysteme nach [14] angegeben.

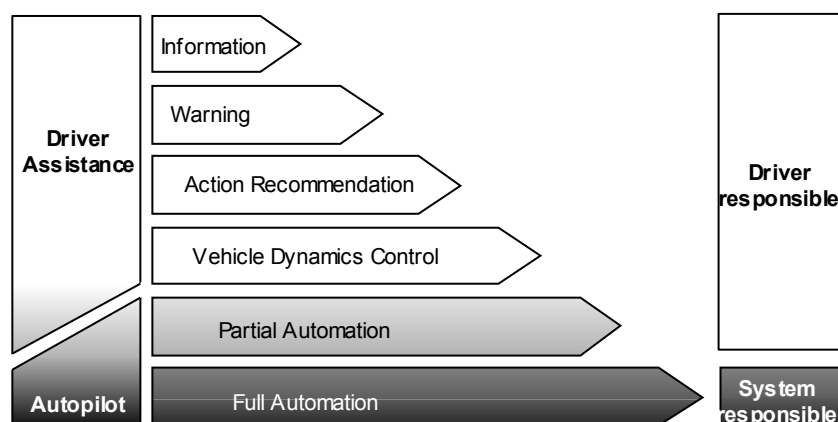


Bild 7. Klasseneinteilung der Fahrerassistenzsysteme nach [14]

Informationssysteme: Der Fahrer erhält zusätzliche Informationen, die seine Wahrnehmungssicherheit stützen, deren Interpretation allerdings vollständig Aufgabe des Fahrers bleibt. Der Fahrer wird kognitiv beansprucht. Deshalb kann eine Unterstützung des Fahrers nur im Zeithorizont der Führungsaufgabe (> ungefähr 3s) funktionieren. Typische Beispiele sind: Nachtsichtgerät, Außentemperaturanzeige, Park Distance Control.

Warnsysteme: Über die reine Information hinaus erhält der Fahrer durch visuelle oder akustische Anzeigen Hinweise über erforderliche Eingriffe. Der Fahrer wird kognitiv beansprucht. Deshalb kann eine Unterstützung des Fahrers nur im Zeithorizont der Führungsaufgabe (> ungefähr 3s) funktionieren. Typische Beispiele sind: Abstandswarnung, Lane Departure Warning, Curve Speed Warning z.B. [36].

Intuitive Handlungsempfehlung: Die Übermittlung der Handlungsempfehlung bewirkt beim Fahrer eine intuitiv richtige Reaktion ohne kognitive Beanspruchung. Sie kann im Zeithorizont der Stabilisierungsaufgabe wirken. Typische Beispiele sind: Aktives Gaspedal, Aktives Lenkmoment/Lenkassistent, Aktives Bremspedal/Bremsassistent [37-39].

Fahrdynamikregelung: Sie sichert heute schon Stabilität und Steuerbarkeit des Fahrzeuges (Stabilisierungsebene); sie verbessert die Vorhersehbarkeit der Fahrzeugdynamik bis in den Grenzbereich (Stabilisierungsebene); sie wird zukünftig die Fahrspurhaltung umfassen (Führungsebene). Typische Beispiele sind: ABS, ASC, DSC, Lane- oder Road-Keeping-Control z.B. [36].

Partial Automation: Die Aktivierungsentscheidung erfolgt durch den Fahrer, das System übernimmt Teilfunktionen der Fahraufgabe auf der Führungsebene. Typische Beispiele sind: ACC, Bremsassistent plus

Full Automation: Wesentliches Merkmal ist die Aktivierungsentscheidung durch das System ohne den Fahrer. Das System übernimmt zeitlich begrenzt eine Notfallmaßnahme, z. B. bei handlungsunfähigem Fahrer (Schlaf, Ablenkung, Zeitanforderungen unterhalb der Fahrerreaktionszeiten ...) oder in fernerer Zukunft möglicherweise weitere Teilumfänge der Fahraufgabe. Typisches Beispiel ist: Autonomer Notbremsassistent [36].

4.1. Diskussion des Problems „Konsumierbarkeit“ anhand der bisherigen Erfahrungen mit Schlupfregelsystemen

Von den verschiedenen Klassen der Fahrerassistenzsysteme (Bild 7) haben die fahrdynamischen Regelsysteme wie das Antiblockiersystem ABS, die Antriebsschlupfregelung ASR/ASC und die automatische Stabilitätsregelung ESP/DSC den größten Grad an Verbreitung im Markt gefunden.

Nach der Einführung im Jahr 1978 fand das ABS zunächst in Oberklassefahrzeugen und dann während der 80er Jahre auch in der Mittelklasse Verbreitung, und man wartete gespannt auf eventuelle Nachweise der sicherheitstechnischen Wirksamkeit dieses Systems im Unfallgeschehen.

Die frühesten Ergebnisse schienen die Theorie der Risikohomeostase zu bestätigen: In statistischen Auswertungen aus den USA [40], [41] ließ sich keine generelle Reduktion des Unfallrisikos nachweisen. In einer Feldstudie zur Unfallbeteiligung von Taxifahrern in Deutschland [42] zeigte sich sogar eine leichte Steigerung der Unfallbeteiligung der ABS-Nutzer gegenüber der Kontrollgruppe ohne ABS, die von

den Experimentatoren einer subjektiv höheren Risikobereitschaft der ABS-Nutzer zugeschrieben wurde.

Erst eine schwedische Studie [43], die in der statistischen Auswertung der polizeilich erfassten Unfalldaten zwischen verschiedenen Unfalltypen differenzierte und den Zustand der Straßenoberfläche (trocken, nass, Schnee/Eis) als weiteren Einflussfaktor einführte, wies für Auffahrunfälle (rear-end accidents) folgendes nach:

“There is a large, significant and consistent difference between cars with and without ABS depending on the road condition and if the car was struck from behind, or acting as the bullet car. On dry surface, the ABS cars are almost equally acting as target or bullet car, but with reduced road friction, the picture changes dramatically, so that on snow/ice, the ABS is seldom the bullet car, while it is proportionally very often acting as the struck car.”

Die Schwierigkeit, eine generelle unfallsenkende Wirkung des ABS nachzuweisen, hat mehrere Ursachen:

- Die Wirksamkeit des ABS beschränkt sich grundsätzlich nur auf Fahrzustände während des Bremsens,
- dabei wiederum nur auf Bremsvorgänge in der Nähe der Kraftschlussgrenze.
- Auf trockener Straße liegt die Kraftschlussgrenze jedoch so hoch, dass sie außerhalb des Fahrverhaltensrepertoires (Drivers experience envelope) des weitaus größten Anteils der Fahrerpopulation liegt.

Erst unter den niedrigen Reibwertverhältnissen der mit Schnee oder Eis bedeckten Fahrbahnen kommt es dazu, dass die vom Gros der Fahrerpopulation eingesteuerten Bremskräfte das verfügbare Kraftschlusspotential zwischen Reifen und Straße überschreiten, und die mit ABS ausgerüsteten Fahrzeuge den durch blockierende Räder eintretenden Fahrzustand von Instabilität und Lenkunfähigkeit verhindern.

Auf der technologischen Basis des ABS erfolgten stufenweise wesentliche Entwicklungsschritte, die den Funktionsumfang über die Assistenz beim Bremsen im Grenzbereich hinaus erweiterten. So wurden ab 1986 die Antriebsschlupfregelungen ASR/ASC eingeführt, die Fahrstabilität und Lenkbarkeit beim Antreiben aufrechterhalten sowie durch radindividuelle Regelung von Bremskräften an den beiden Rädern der Antriebsachse auf links/rechts unterschiedlichen Reibverhältnissen die Traktionsfähigkeit verbessern. Ab 1996 folgten schließlich die Systeme ESP/DSC, die zusätzlich die Fahrstabilität beim Lenken sowie bei kombinierten Lenk-/Bremsmanövern bzw. Lenk-/Antriebsmanövern durch das aktive Einsteuern von radindividuell geregelten Bremskräften an allen vier Rädern absichern.

Aufgrund des schnell wachsenden Ausrüstungsgrades konnte schon ab 2002 von mehreren Institutionen ermittelt werden, dass diese Systeme das Schleuderrisiko um bis zu 50% reduzieren [44-53] und damit das Fahrverhalten auch im Grenzbereich weitgehend beherrschbar gestalten.

Anhand des Detailfehlerbaums in Bild 8 [14] wird die breite Wirkungsweise des DSC deutlich, das für den Fall eines übertrieben starken Fahrereingriffs beim Lenken, Bremsen, Beschleunigen oder kombinierten Stelleingriffen in jeden Eingangszweig des ODER-Gatters ein verriegelndes UND-Gatter einfügt (vgl. Bild 6)

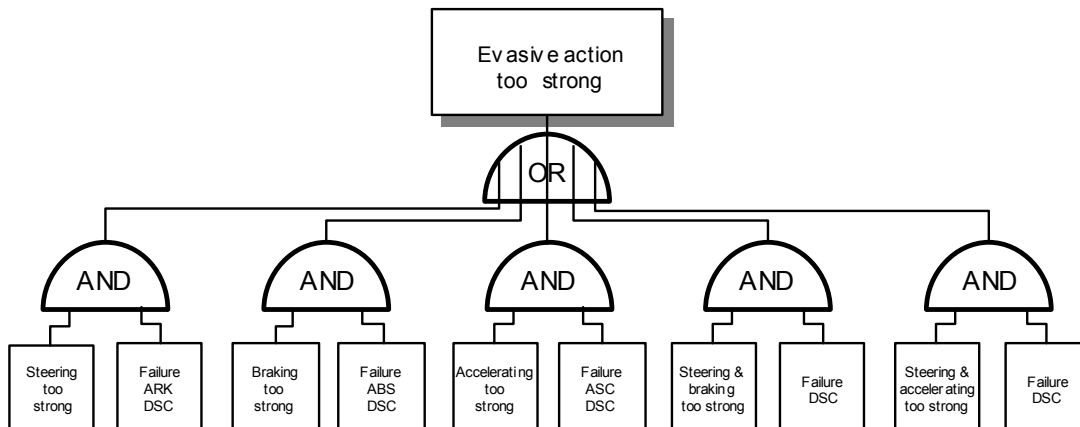


Bild 8. Korrektur übertrieben starker Fahrereingriffe durch Fahrwerksregelsysteme [14]

4.2. Schlupfregelsysteme als Vorbilder für zukünftige Fahrerassistenzsysteme

Anhand der Schlupfregelsysteme soll beispielhaft gezeigt werden, was „richtig“ gemacht heißt. Als Grundvoraussetzungen für die erfolgreiche Funktion von Regelkreisen sind die Kriterien Beobachtbarkeit, Steuerbarkeit und Stabilität zu nennen. Durch die Messung der vier Raddrehzahlen und nachfolgend der Giergeschwindigkeit und des Lenkradwinkels wird das Kriterium der Beobachtbarkeit entscheidend über die Wahrnehmungsfähigkeit des Fahrers hinaus ausgedehnt. In gleicher Weise geht auch die Regelung von vier individuellen Radbremsdrücken weit über das hinaus, was der Fahrer leisten könnte und zwar einerseits durch die notwendige Beschränkung auf ein Bremspedal (je ein Bremsbedienelement pro Rad würde den Fahrer überfordern) und andererseits durch die Schnelligkeit der Regelkreise, die durch Taktzeiten im ms-Bereich gekennzeichnet ist, während der Fahrer Verzugszeiten von ca. 0,5 s kaum unterschreiten kann.

Das Kriterium der Steuerbarkeit kann nur dadurch erfüllt werden, dass der aktuelle Bewegungszustand des Fahrzeuges noch eine Reserve gegenüber der Grenze des Kraftschlusspotentials aufweisen muss. Auch hier ist der Fahrer überfordert, wie in Fahrzeugen ohne Schlupfregelsysteme blockierende Räder beim starken Bremsen oder durchdrehende Räder bei hohen Antriebsmomenten aufzeigen.

Damit zusammen hängt das Kriterium der Stabilität. Bei blockierenden oder durchdrehenden Rädern an der Hinterachse geht die Stabilität des Bewegungszustandes verloren und der durch normal trainierte Fahrer unbeherrschbare Zustand des Schleuderns tritt ein.

Folgende Anforderungen an die Funktion von Fahrerassistenzsystemen lassen sich aus dem Erfolg der Schlupfregelsysteme ableiten.

- **Anzahl der beobachteten Messgrößen und der daraus abgeleiteten Zustandsgrößen für den spezifischen Funktionsumfang größer als beim Fahrer.**
- **Eingriffsgeschwindigkeit höher als die des Fahrers.**

- **Anzahl der Stellgrößen höher als diejenigen, die der Fahrer gleichzeitig handhaben kann.**
- **Wirkungsweise als stummer Kopilot, der keine zusätzlichen Leistungsanforderungen an den Fahrer stellt.**
- **Das Angebot einer geeigneten optischen Anzeige, die den Fahrer über die Nähe zur Grenze des Kraftschlusspotentials informiert.**

Die Fahrzeugführungsaufgabe stellt über die drei Grundkriterien Beobachtbarkeit, Steuerbarkeit und Stabilität hinaus eine ganz wesentliche Zusatzanforderung, nämlich die der Fahrspurhaltung. Damit ist gemeint, dass das Fahrzeug innerhalb der engen Grenzen der eigenen Fahrspur oder zumindest der Fahrbahn gehalten werden muss. Dieses Kriterium kann durch die Schlupfregelsysteme nicht erfüllt werden, weil die beobachteten Messgrößen und die daraus ableitbaren Zustandsgrößen fahrzeuginterne Signale darstellen, ihnen jedoch der Bezug zum Kontext des Straßenverlaufs fehlt. Die in Entwicklung befindliche Sensortechnologie zur Erfassung des Fahrzeugumfeldes wird in Zukunft zur Beherrschung des Spurhaltekriteriums beitragen [54].

5. Konsumierungsaspekte am Beispiel des Übergangs in eine Kurvenfahrt

Der Übergang von einer ungestörten Geradeausfahrt in eine potentiell kritische Kurvenfahrt auf einer zweispurigen Straße soll als leicht verständliche Verkehrssituation dazu dienen, die bisherigen Erläuterungen auf einen praxisnahen Fall zu übertragen. Diese Fahrsituation diente bereits 1978 in einer Projektgruppe der Bundesanstalt für Straßenwesen zur Herleitung einer Zeitphasenabfolge von Fahrerhandlungen, Bild 9 [27].

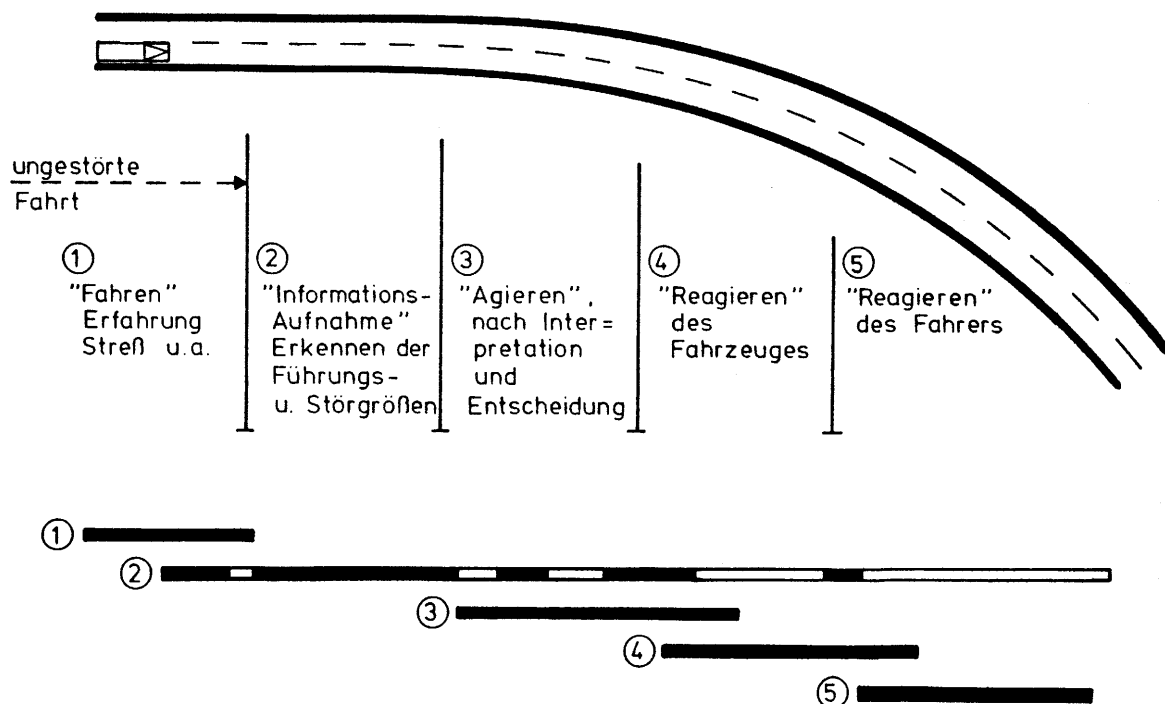


Bild 9. Zeitlicher Ablauf einer potentiell kritischen Fahrsituation [27]

Diese Fahrsituation erweist sich auch aufgrund des realen Unfallgeschehens als bezüglich des Themas „Konsumierung“ interessanter Fall:

- Gefahren auf Landstrassen werden i. allg. deutlich unterschätzt; 64% aller Getöteten sind auf Außerortsstraßen (ohne Autobahnen) zu beklagen [55].
- Ergänzend weisen nach [56] un stetig einbahnig zweistreifige Außerortsstraßen die meisten Unfälle mit schweren Personenschäden auf Grund falsch gewählter Geschwindigkeiten auf.
- Auf diesen Strassen haben Fahrurfälle in Kurven mit Personenschäden den höchsten Anteil [55]. Solche Unfälle werden häufig ausgelöst „durch Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug, z.B. wegen nicht angepasster Geschwindigkeit oder falscher Einschätzung des Straßenverlaufs o.ä., ohne dass andere Verkehrsteilnehmer dazu beigetragen haben“. Zudem kann es infolge unkontrollierter Fahrzeugbewegungen zum Zusammenstoss mit anderen Verkehrsteilnehmern kommen [55], [57]. Nach [58] ist der Fahrer bei $\frac{3}{4}$ der Schleuderunfälle in der Precrash-Phase unachtsam (was auch einem bewusst agierenden Fahrer passieren kann) oder er begeht einen Fahrfehler, so dass das Fahrzeug vom Fahrer nicht mehr stabilisiert werden kann.

Diese in der Literatur genannten Verhaltensweisen weisen auf ein mangelndes Situationsbewusstsein („situation awareness“) beim Fahrer hin, das mithilfe geeigneter Assistenzsysteme verbessert werden kann. Bild 10 zeigt schematisch den zeitlichen Ablauf eines derartigen Übergangs von der Geradeausfahrt in eine zunächst klothoidenförmig enger werdende Kurve, wobei der fiktive Fahrer durch die Wahl seines Fahrstils sein Verhaltensrepertoire mehr oder weniger stark ausschöpft. Bei defensiver Fahrweise leitet er die Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit schon weit vor dem Kurveneingang ein und kann so die Verzögerung sehr moderat gestalten. Beim aggressiven Fahrstil mit hoher Ausgangs- und Kurvengeschwindigkeit ist die Abbremsphase dagegen spät und steil. Wenn – wie hier für eine Fahrt im offensiven Fahrstil, also noch innerhalb des Erfahrungshorizontes, angenommen wird – eine Entscheidung für ein zusätzliches Überholmanöver in der Kurve getroffen wird, kann die Grenze des eigenen Verhaltensrepertoires sehr schnell überschritten und die Sicherheitsreserve gegenüber der Kraftschlussgrenze aufgezehrt werden.

Die in Bild 10 gezeigte Spannweite zwischen offensivem und defensivem Fahrstil soll im folgenden Bild 11 zugrunde gelegt werden, dessen Grundansatz (potentielles Gefahrenniveau über der Fahrzeit, wie auch beim unteren Teilbild 10) aus [59] entnommen ist. Für die folgenden Erläuterungen nehmen wir einen Fahrer mit offensivem Fahrstil, also an der Grenze seines eigenen Verhaltensrepertoires, an. Der Fahrtverlauf beginnt mit der ungestörten Geradeausfahrt. Innerhalb des Zeithorizontes der Führungsebene (Minuten bis Sekunden vor Kurvenbeginn) muss nun der Fahrer die Eigenschaften der vorausliegenden Kurve sowie den Bewegungszustand des eventuell in der Kurve befindlichen Verkehrs abschätzen, um geeignete Führungsgrößen abzuleiten. Gerade hierzu wird in der vorliegenden Literatur die mangelnde Sensibilisierung junger Fahrer für potentielle Gefahren berichtet, die zu einem hohen Anteil der überhöhten Geschwindigkeit an den Unfallursachen führt [60], [61], [62]. Es werden auch bestimmte Merkmale der Straßengestaltung genannt, die dem Fahrer keine optimale Voreinschätzung seines Geschwindigkeitsverhaltens ermöglichen (z.B. [63], [64]). Nach [65] ist die Frage, wie Fahrer ihre Geschwindigkeiten in Kurven wählen, noch unzureichend geklärt.

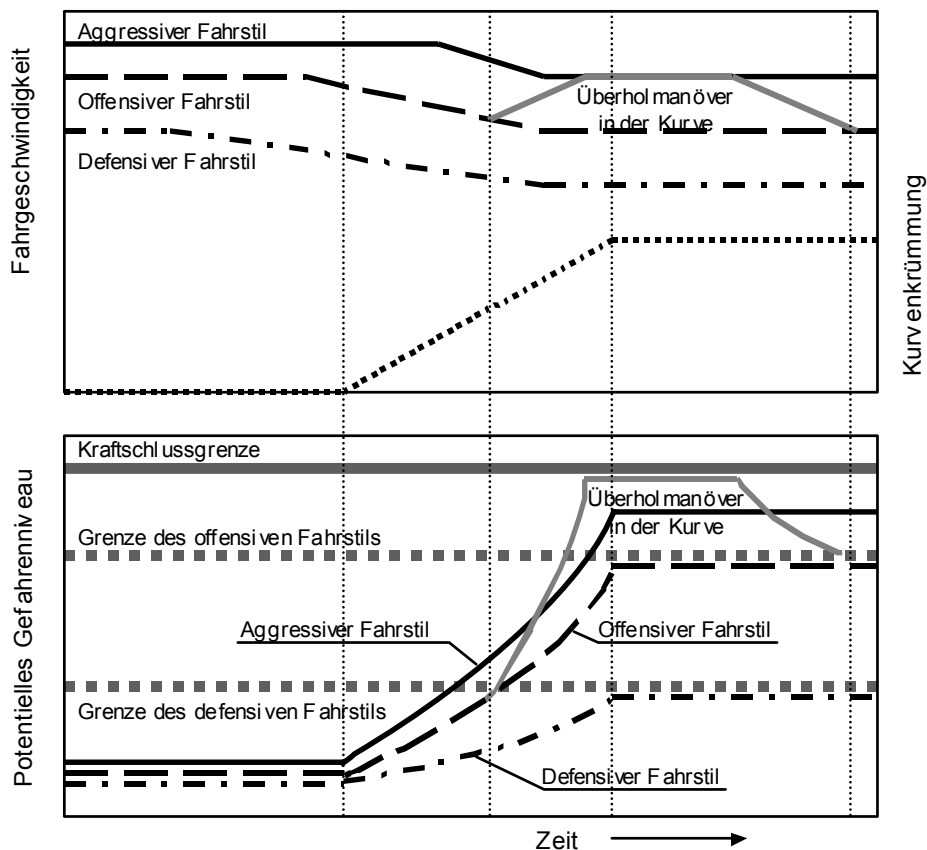


Bild 10. Zeitlicher Ablauf einer potentiell kritischen Kurvenfahrt in Abhängigkeit des gewählten Fahrstils

Das potentielle Gefahrenniveau steigt nun für den Fahrer entsprechend des von ihm gewählten offensiven Fahrstils und seiner Abschätzung der Grenze zur Gefahr [66] entlang der oberen Linie auf das „maximale potentielle Gefahrenniveau“ im Kernbereich der Kurve, das möglicherweise aufgrund der o. a. Sachverhalte per se bereits unsicher ist oder für eventuelle unvorhersehbare Störungen keine Sicherheitsreserven mehr übrig lässt.

Aufgrund der in Abschnitt 3.3. beschriebenen Zeitkriterien werden als Unterstützung für den Fahrer zwei Kategorien von Assistenzsystemen betrachtet:

- Informations- und Warnsysteme, die im Zeithorizont der Führungsaufgabe wirksam werden, und
- Eingreifende Systeme, die innerhalb der Kurve die Aktionen des Fahrers unterstützen oder selbsttätig wirksam werden.

Ein „Curve Speed Assistant“ auf der Basis einer digitalen Straßenkarte aus dem Navigationssystem empfiehlt dem Fahrer eine Kurvengeschwindigkeit zu einem Zeitpunkt t_{A1} , zu dem der Fahrer selbst diese Kurve möglicherweise noch nicht erkennen kann. Zum Zeitpunkt t_{A2} liefert ein zweites Warnsystem auf der Basis von „car to car communication“ [67], [68] Informationen über Mit- und Gegenverkehr und gibt geeignete Handlungshinweise. Folgt der Fahrer den Hinweisen, so erniedrigt sich das Gefahrenniveau bereits während der Zufahrt zur Kurve auf die Linie „mittleres Gefahrenniveau bei Akzeptanz der Führungsassistenz“.

Innerhalb der Kurve seien Assistenzsysteme wirksam, die die Fahrerhandlungen

Absolute Grenzfälle stellen Rennfahrer dar, die sich praktisch permanent sowohl an der Grenze des persönlichen Fahrkönnens als auch am physikalischen Grenzbereich befinden, und damit trotz günstiger Voraussetzungen (höchstes Fahrkönnen, kein Gegenverkehr usw.) relativ hohe Unfallraten aufweisen.

Die vorliegende Arbeit hat die Kurvenfahrt auf Landstrassen als unfallrelevante Verkehrssituation ausgewählt. Dabei zeigt es sich, dass eine Erhöhung des Kraftschlusspotentials nicht zwangsläufig zur Verbesserung der Fahrsicherheit führt. Erst die „richtige“, zeitlich aufeinander abgestimmte Kombination der heutigen und künftig verfügbaren Informations-, Warn- und Eingreifsysteme wird in der Lage sein, die Konsumierungsgefahr auch offensiver Fahrer auf einen kleinen Rest oder sogar auf Null zu reduzieren. Auf die positive Wirkung zweier kombinierter Teilsysteme hat Bubb schon kürzlich hingewiesen [71].

Da sich die quantitative Bewertung des Sicherheitsgewinns von Assistenzsystemen in definierten Verkehrssituationen noch im Anfangsstadium befindet [36,71], konnte diese Untersuchung nur qualitative Ergebnisse bringen. Auch wenn hierbei nur die Kurvenfahrt auf Landstrassen berücksichtigt wurde, ist dennoch zu erwarten, dass die Befürchtungen von Fiala, Wilde, Klebelsberg u.a., technische Maßnahmen zur Verbesserung der aktiven Sicherheit unterlägen grundsätzlich und (fast) zwangsläufig der Konsumierung durch offensive Fahrer, nicht zutreffen, wie das Beispiel der Schlupfregelsysteme überzeugend nachgewiesen hat. Voraussetzung ist zweifellos, dass die Systeme „richtig“ gemacht sind und ihre Wirkungsweise für den Fahrer richtig kommuniziert wird.

Die Autoren danken den Herren Dr. W. Prestl, Prof. Dr. G. Roppenecker und M. Wegscheider für ihre wertvollen Diskussionsbeiträge.

Schrifttum

- [1] K. Wilfert: „Sicherheitsprobleme bei der Entwicklung von Personenwagen“ ATZ 1967, S.48-53
- [2] U. Seiffert: „Fahrzeugsicherheit“ in: Braess/Seiffert (Hrsg.): „Handbuch Kraftfahrzeugtechnik“ 4. Aufl. Vieweg Verlag 2005
- [3] G. Reichart: „Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen“ Fort.-Ber. VDI Reihe 22 Nr.7, 2001
- [4] G.J.S. Wilde: „The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health“ Risk Analysis 1982, pp.209-225
- [5] Mehrere Autoren: „Proc. of CEC Workshop on Risky Decision-Making in Transport Operations“ Ergonomics 1988, Vol.31, No.4
- [6] R. Schäffer et al.: „Risikoeinschätzung und Risikoverhalten in einer simulierten Straßenverkehrssituation“ Z. für Verkehrssicherheit 1998, S.158-163
- [7] G. Kebeck, A. Pedersen: „Der Risikohaushalt des Autofahrers“ Z. für Verkehrssicherheit 1999, S.163-171
- [8] D. Klebelsberg: „Verkehrspsychologie“ Springer Verlag 1982
- [9] C.S. Dula, E.S. Geller: „Risky, aggressive or emotional driving: Addressing the need for consistent communication in research“ J. of Safety Research Vol. 34, Issue 5 (2003), pp.559-566
- [10] U. Schulz et al.: „Motivationale und emotionale Aspekte des Autofahrens“ Z. für Verkehrssicherheit 2000, S.49-56

- [11] T. Lajunen, D. Parker: „Are aggressive people aggressive drivers? A study of the relationship between self-reported general aggressiveness, driver anger and aggressive driving“ Accident Analysis & Prevention 2001, pp.243-255
- [12] G. Reichart, E. Hipp: „MoTiV - Fahrerassistenzsysteme“ in: „Mobilitätsforschung für das 21. Jahrhundert“ 4./5. Mai 2000, Göttingen (BMBF/BMVBW) Dokumentation TÜV Rheinland 2000, S.85-107
- [13] T. Jürgensohn, K.-P. Timpe: „Kraftfahrzeugführung“ Springer Verlag 2001
- [14] E. Donges: „A conceptional framework for active safety in road traffic“ Vehicle Systems Dynamics 1999, pp.113-128
- [15] H.-P. Krüger, S. Buld: „Das Konzept des Situationsbewusstseins und seine Implikationen für die Fahrsicherheit“ Januar 2004
- [16] A. Rakotonirainy, F. Maire: „Context-aware driving behaviour mode“ ESV-Konferenz 2005
- [17] K. Kikuchi, T. Fujii: „Research on the evaluation method of driver behaviour using driver support systems“ ESV-Konferenz 2005, paper 05-0353
- [18] Anon.: „Unfalldisposition und Fahrpraxis“ ATZ 1976, S.129
- [19] G. Willmes-Lenz: „Internationale Erfahrungen mit neuen Ansätzen zur Absenkung des Unfallrisikos junger Fahrer und Fahranfänger“ Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft M 144, 2003
- [20] Statistisches Bundesamt: „Verkehrsunfälle 2004“ Wiesbaden
- [21] H. Erke: „Symposium Begleitetes Fahren mit 17 in Niedersachsen“ Z. für Verkehrssicherheit 1/2006, S.48-50
- [22] M. Burckhardt: „Fahrer, Fahrzeug, Verkehrsfluß und Verkehrssicherheit – Folgerungen aus den Bewegungsgesetzen für Fahrzeug, Straße und Fahrer“ zitiert in [26]
- [23] U. Hackenberg, B. Heißing: „Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr“ ATZ 1982, S.341-345
- [24] M. Wegscheider, G. Prokop: „Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrer-Assistenzsystemen“ VDI-Ber. Nr.1900, 2005, S.17-36
- [25] J. Rasmussen: „Skills, Rules and Knowledge; Signals, Signs and Symbols and other Distinctions in Human Performance Models“ IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC 13, No.3 (1983) S. 257-266
- [26] E. Donges: „Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur aktiven Sicherheit im Strassenverkehrssystem“ Ergänzungspapier zum VDI-Ber. 948 (1992)
- [27] H. Appel et al.: „Fahrer-Fahrzeugverhalten in kritischen Situationen“ Projektgruppenbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln, 1978
- [28] H.J. Förster: „Menschliches Verhalten, eine vergessene Ingenieur-Wissenschaft?“ Abschiedsvorlesung U. Karlsruhe, Januar 1987
- [29] E. Donges: „Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt“ Diss. TH Darmstadt 1977
- [30] K. Enke: „Possibilities for improving safety within the driver-vehicle-Environment control loop“ ESV-Konferenz 1979, Berichtsband S.789-802
- [31] T. Wakasugi: „A study on warning timing for lane change decision and Systems based on driver's lane change maneuver“ ESV-Konferenz 2005, Paper 05-0290
- [32] W. Hacker: „Arbeitspsychologie“ VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1986
- [33] A.D. Swain, H.E. Guttmann: „Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application“ Final Report US Nuclear

- Regulatory Commission NUREG/CR-1278, Washington D.C., 1983
- [34] H.-H. Braess, G. Reichart: "PROMETHEUS: Vision des "intelligenten Automobils auf der intelligenten Strasse"- Versuch einer kritischen Würdigung" ATZ 1995,, S.200-205 und S.330-334
- [35] INVENT-Abschlußpräsentation , München 27./28.4.2005 (www.invent-online.de)
- [36] S. Busch: „Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme“ Fort-Ber. VDI, Reihe 12, Nr.588, 2005
- [37] E. Donges, K. Naab: Regelsysteme zur Fahrzeugführung und –stabilisierung in der Automobiltechnik. at – Automatisierungstechnik 44 (1996) S. 226-236
- [38] A. Faulhaber et al.: „Der Lenkassistent in der neuen A- und B-Klasse“ 6. Int. Stuttgarter Symp. 2005, Berichtsbd. S.365-375
- [39] J. Pohl, J. Ekmark: "Development of a haptic intervention system for unintended lane departure" SAE 2003-01-0282
- [40] IIHS Status Report, Vol.29, No.2, Insurance Institute for Highway Safety, Arlington, Januar 1994
- [41] L. Evans: "Antilock brake systems and risk of different types of crashes in traffic" ESV-Konferenz 1998, Vol.1, pp.445-461
- [42] B. Biehl et al.: „Einfluß der Risikokompensation auf die Wirkung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen am Beispiel ABS“ Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr Nr.63, Köln 1987
- [43] A. Kullgren et al.: „The effectiveness of ABS in real life accidents“ ESV-Konferenz 1994, paper 94-S4-O-07
- [44] J. Breuer: „Objektive Bewertung der aktiven Sicherheit von Fahrzeugen: Kritische Betrachtung“ VDA Techn. Kongreß 2002, Berichtsband S.103-113
- [45] C. Tingvall et al.: „The effectiveness of ESP in reducing real life accidents“ ESV-Konferenz 2003, paper 261
- [46] M. Rabe: „Zukünftige Mobilität“ in: Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel, 5. Braunschweiger Symposium Feb. 2004
- [47] K. Langwieder et al.: „International field experiences with electronic stability Program (ESP) in cars“ FISITA-Kongress 2004, paper F2004V013
- [48] H. Becker et al.: "Methods for the evaluation of primary safety measures by Means of accident research" FISITA-Kongress 2004, paper F2004V039
- [49] T. Unseldt et al.: "Avoidance of Loss of Control Accidents through the benefit of ESP" FISITA-Kongress 2004, paper F2004V295
- [50] A. Lie et al.: "The effectiveness of ESC (Electronic Stability Control) in reducing real life crashes and injuries" ESV-Konferenz 2005, paper 05-0135
- [51] G. Rieger et al.: "Active safety systems change accident environment of vehicles significantly – a challenge for vehicle design" ESV-Konferenz 2005, paper 05-0053
- [52] J.M. Blosseville: "Some achievements of ACROS on driver assistance functions" 5. Int. Congress ITS, 2005, Hannover
- [53] Anon. : „ESP macht das Fahren sicherer“ Z. für Verkehrssicherheit 2/2005, S.61
- [54] P. Knoll: „Fahrerassistenzsysteme“ in Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 4. Auflage, Vieweg Verlag
- [55] D. Ellinghaus, J. Steinbrecher: „Fahren auf Landstrassen – Traum oder Albtraum?“ UNIROYAL-Verkehrsuntersuchung Nr.28,, 2003
- [56] D. Ebersbach, C. Mayser: „Curve Speed Assistant – Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit auf Außerortsstraßen“ VDI-Ber. 1864 (2004) („Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme), S.497-529

- [57] H. Erke: „Unfallfreier Strassenverkehr – eine Vision?“ ADAC Tag der Verkehrssicherheit 2003, Dokumentation S.32-42
- [58] K. Langwieder: „Rahmenbedingungen und Potentiale für den Insassenschutz von morgen“ IRR-Tagung „Innovative Sicherheitssysteme im Kfz“ Juli 2000, Stuttgart
- [59] H. Braun, J. Ihme: “Definition kritischer Situationen im Kraftfahrzeugverkehr- Eine Pilotstudie“ Automobil-Industrie 3/1983, S:367 ff.
- [60] E. Meier, G. von Bressendorf: “Entwicklung des Fahrverhaltens nach Ausbildung und Prüfung“ VDI-Ber. 1064, 1993, S.15-32
- [61] H.A. Deery: „Hazard and risk perception among young novice drivers“ J. of Safety Research, Vol.30, Issue 4, 1999, pp.225-236
- [62] D. Begg, J. Langley: “Changes in risky driving behaviour from age 21 to 26 years” J. of Safety Research, Vol.32, Issue 4, 2001, pp.491-499
- [63] G. Kanellaidis: “Factors affecting drivers choice of speed on roadway curves” J. of Safety Research, Vol.26, Issue 1, 1995, pp.49-56
- [64] K.-W. Herberg: “Auswirkungen des Strassenbildes auf die Geschwindigkeit” VDI-Ber. 1064, 1993, S.33-39
- [65] A. MC Odhams, D.J. Cole: “Models of driver speed choice in curves” AVEC 2004
- [66] H. Bubb: „Der Fahrprozess – Informationsverarbeitung durch den Fahrer“ VDA Techn. Kongress 2002, Berichtsbd. S.19-36
- [67] I. Paulus et al.: “Fahrzeug-Fahrer und Fahrzeug-Infrastruktur Kommunikation in Europa“ VDA Techn. Kongreß 2005, Berichtsband S.243-255
- [68] F. Mildner: Untersuchungen zur Erkennung und Vermeidung von Unfällen für Kraftfahrzeuge“ Diss. UBW Hamburg 2004
- [69] H. Wandke et al.: “Handlungsbezogene Elementarbausteine für Fahrer-Assistenzsysteme“ VDI-Ber. 1919, 2005, S:41-62
- [70] H. Wolf et al.: “ Ergonomische Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion bei gleichzeitig agierenden Fahrerassistenzsystemen“ Z. für Verkehrssicherheit 3/2005, S.119-124
- [71] H. Bubb: „Das Potenzial der Risikovermeidung durch Assistenzsysteme im Strassenverkehr“ risk tech 24./25.10.2005, TÜV Süd