

# Test- und Bewertungsmethoden für Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene

## Test and Evaluation Methods for Safety Systems on the Guidance Level

Norbert Fecher, Fabian Regh, Stefan Habenicht, Jens Hoffmann und Hermann Winner

Im Rahmen dieses Artikels werden zwei methodische Ansätze vorgestellt, anhand derer die Frage nach dem bestehenden Prüfbedarf für Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene einerseits aus System- und andererseits aus Manöversicht beantwortet wird. Basierend hierauf wird beispielhaft gezeigt, welche Bereiche mit bekannten Testverfahren bereits adressiert werden und wo noch Entwicklungsbedarf besteht. Am Beispiel des Darmstädter Verfahrens mit EVITA (Experimental Vehicle for Unexpected Target Approach) zur Bewertung von Frontkollisionsgegenmaßnahmen werden Anforderungen, Umsetzung sowie die Validierung neuartiger Testverfahren gezeigt.

In the context of this article two systematic approaches are presented to answer the question, which scenarios are to be considered for evaluating and testing collision-avoidance-systems as well from the view of the system as of the view of the manoeuvre. Furthermore, this paper provides an overview over the existing test methods and the non-testable areas. Taking "Darmstadt's Test and Evaluation Tool EVITA (Experimental Vehicle for Unexpected Target Approach)" as an example for novel test methods, requirements, realization and validation are shown.

**Schlagwörter:** Testverfahren, Bewertungsverfahren, Szenarien, Kollision

**Keywords:** Testing, evaluation methods, scenarios, collision

## 1 Einleitung

Der Einzug der Elektronik in die Automobiltechnik ermöglichte die Entwicklung mechatronischer Systeme, die Regelfunktionalitäten zur Fahrerunterstützung bieten. Den Beginn markierte das Anti-Blockier-System (ABS), es folgte die Antriebsschlupfregelung (ASR), und schließlich mündete die Entwicklung in die Fahrdynamikregelung Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP).

Gemäß der Einteilung nach dem Drei-Ebenen-Modell von Donges [1] dienten diese ersten mechatronischen Sicherheitssysteme einer Verbesserung der Regelungsgüte auf der Stabilisierungsebene.

Mit zunehmender Sensor- und Prozessorleistung, vor allem aber der Entwicklung von automobiltauglichen Umfeldsen-

soren, fanden sich Komfortsysteme wie die Adaptive Cruise Control (ACC) auf dem Markt, die dem Fahrer eine Unterstützung erstmals auch auf der Bahnführungsebene anboten, auf der die Fahrtrajektorienparameter Spurlage und Geschwindigkeit festgelegt werden.

Auf Basis dieser Technik entwickelten sich auch Sicherheitssysteme mit Wirkungsbereich auf der Bahnführungsebene, wie z.B. Braking Guard [2], Collision Mitigation Brake System (CMBS) [3], PRE-SAFE Bremse [4] etc. Künftig zu erwartende Systeme zur Ausweichassistenz, Kreuzungsassistentz und Collision Avoidance werden diesen Trend fortsetzen.

Sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Einführung solcher Assistenzsysteme nehmen, neben der reinen Umsetzung der Funktion, die Bewertung und der Test der

Systeme einen hohen Anteil der Entwicklungsarbeit ein. Der Test aktueller und künftiger Fahrerassistenzsysteme erfolgt aus drei unterschiedlichen Blickwinkeln. Hierbei kann zwischen den Prüfzielen Funktionalität, Systemrobustheit und Nutzen der Funktion unterschieden werden (siehe Tabelle 1):

- **Funktionalität**  
Die Funktionalität der Systeme gilt dann als eingeschränkt, wenn an sich für die Ausführung der Funktion erforderliche Erkennungen ausbleiben. Das kann an der Art der Hindernisse liegen oder an anderen Umständen wie z. B. Wetter- oder Fahrbahnbedingungen. Das Ergebnis einer systematischen Überprüfung der Funktionalität liefert die „False-Negative-Rate“.
- **Systemrobustheit**  
Der Gegenpart zur eingeschränkten Funktionalität wird als „False-positive“ bezeichnet. Die Robustheit der Systeme beschreibt das Auftreten von Fehlauflösungen. Diese haben neben einer möglichen Gefährdung weiterer Verkehrsteilnehmer auch signifikanten Einfluss auf die Akzeptanz der Kunden.
- **Nutzen**  
Der quantitative Nachweis des Nutzens ermöglicht Gesetzgebern, Ratingagenturen, Versicherungen und den Kunden ein Maß für die Sicherheitswirkung bei korrekter Funktion. Die Ermittlung des Nutzens setzt reproduzierbare Prüfungen mit definierten Randbedingungen voraus, damit ein sinnvoller Vergleich unterschiedlicher Systeme möglich wird.

Während zur Funktionalität und zum Nutzen der Systeme gezielte Anforderungen definiert werden, kann die Robustheit der Systeme nicht auf jeden Einfluss hin geprüft werden.

Alle drei Kategorien stellen eigene Anforderungen an die Testumgebung. Vom Prinzip her ist die Prüfung der Systemrobustheit von nur kurz eingreifenden Sicherheitssystemen eher einfach. Dazu ist „nur“ in allen zu berücksichtigenden Fahrzeugeinsatzszenarien die Systemfunktion mit einem nicht „scharf geschalteten“ System zu erproben. Statt also eine Notbremsung wirklich auszulösen, wird ein Speicher beschrieben und darüber die Zahl der „False-positives“ ermittelt. Bei gegebener Sensorik können auch die Rohdaten dieser Fahrten aufgezeichnet werden und später off-line zum Algorithmestest im Labor eingesetzt werden.

**Tabelle 1:** Prüfziele im Systemtest.

	Eingriff sinnvoll	Eingriff nicht sinnvoll
Erfolgreicher Eingriff	Nutzen	Eingeschränkte Systemrobustheit
Ausbleibender Eingriff	Eingeschränkte Funktionalität	–

Die große Schwierigkeit bei dieser Testkategorie ist das Erreichen einer den Einsatz beim Kunden repräsentierenden Vollständigkeit der Szenarien und die mögliche Exemplarschwankung der Sensoren. Letztendlich wird heute diese Kategorie durch eine große Erprobungsstrecke, zu meist mit Testfahrern, abgedeckt. Eine alternative Absicherungsmöglichkeit besteht in einem Vortest in Analogie zum Trojanischen Pferd. Hier wird eine für das spätere „scharfe“ System gleiche Sensorkonfiguration herangezogen, die z. B. einem Komfortsystem dient. Dabei wird die Sicherheitsfunktion-Software bereits ausgeführt, aber schreibt statt Eingriffe auszulösen in einen nicht-flüchtigen Speicher. Dieser kann per Telematik oder bei Werkstattaufenthalten ausgelesen werden. Auf diese Weise lassen sich auch Testläufe mit 100 Mio. km realisieren, was mit konventionellen Testabläufen unbezahlbar wäre.

Für den Funktionstest und die Nutzenermittlung von Sicherheitssystemen lässt sich auch durch ausgedehnte Testfahrten keine größere Zahl an Nutzfällen generieren, da die Fahrer in dieser Hinsicht zu gut fahren. So beträgt die Kilometerleistung zwischen zwei Unfällen mehrere 100 000 km, zwischen schweren Unfällen mehrere Millionen km und mit Todesfolge zum Glück mehr als 100 Mio. km. Die relevanten Testszenarien werden stattdessen aus der Unfallanalyse ermittelt, wobei wie im Folgenden gezeigt wird, eine angepasste Systematik entwickelt werden muss, um eine noch handhabbare Vielfalt zu ermitteln und trotzdem dabei die relevanten Szenarien abzudecken.

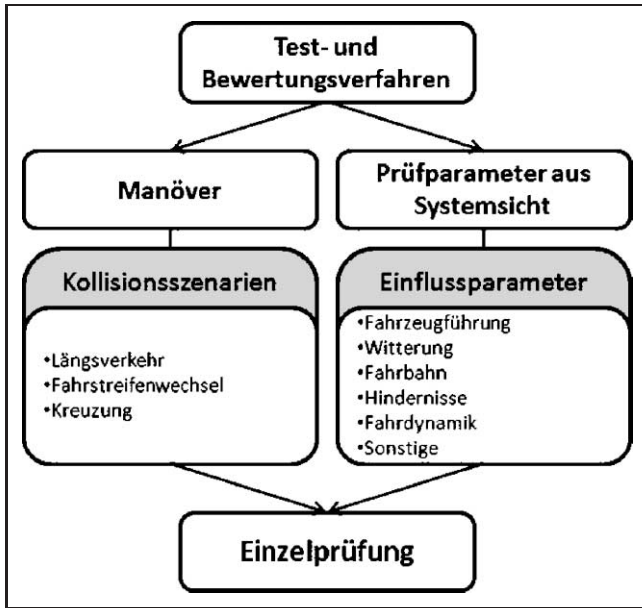
Dieser Artikel stellt zwei methodische Ansätze vor, anhand derer sich der Prüfbedarf einerseits aus Systemsicht und andererseits aus Manöversicht auf ein handhabbares Maß an Prüfparametern reduzieren lässt. Aus der Kombination der Prüfparameter lassen sich in einem weiteren Schritt die Prüfvorschriften für die Einzelprüfungen ableiten.

Für die aktuellen Sicherheitssysteme der Bahnführungsebene wird ein Überblick über die bereits bekannten und derzeit in der Entwicklung befindlichen Test- und Bewertungsverfahren gegeben und aufgezeigt, welche Anforderungen bereits erfüllt werden können und für welche Fragestellungen noch Entwicklungsbedarf besteht.

Am Beispiel des Darmstädter Verfahrens mit EVITA zum Test und zur Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen (z. B. Automatische Notbremse) wird ein auf die Anforderungen der Nutzenermittlung entwickeltes neues Testverfahren gezeigt.

## 2 Test- und Bewertungsverfahren

Die systematische Generierung von Test- und Bewertungsverfahren ist in Bild 1 verdeutlicht. Hierbei werden relevante Kollisionsszenarien ermittelt. Weiter werden die systemspezifischen Einflussparameter hinsichtlich der Validität bewertet. Die Zusammenführung beider Zweige führt zu den Prüfkfigurationen der Einzelprüfungen.



**Bild 1:** Ableitung von Prüfkonfigurationen.

**2.1 Relevante Kollisionsszenarien**

Zur vollständigen Ermittlung der relevanten Kollisionsszenarien werden zunächst die Kollisionseinflüsse bestimmt, wie z.B. Merkmale der Beteiligten, deren Geschwindigkeiten und deren Bewegungsrichtungen. Durch die Kombination dieser Merkmale entstehen dann generische Kollisionsszenarien.

Anschließend werden die Parameter gruppiert. Beispielsweise zählen die Ausgangsmanöverparameter „Geradeaus fahren“, „Abbiegen“ und „Fahrstreifen wechseln“ zur Gruppe „Fahrtrajektorie“. Die charakteristischen Eigenschaften, die offensichtlich nicht zu weiteren Kollisionsszenarien führen, bleiben unberücksichtigt. Neben den benannten Methoden führt insbesondere das Überprüfen der Eignung der Merkmale zur Generierung weiterer Szenarien, das Ausschließen von Doubletten und das Ausschließen von sinnwidrigen Kombinationen zu einer reduzierten Anzahl an Merkmalen. Der hier vorgestellte Ansatz zur Generierung von Kollisionsszenarien berücksichtigt abschließend die folgenden Merkmale:

- das Fahrzeug mit Testsystem,
- die Art des potenziellen Kollisionsgegners,
- die Ausgangslage der Beteiligten und
- die Fahrtrajektorien der Beteiligten.

**2.1.1 Relevante Szenarien**

Die durch Kombination entstehenden potenziellen Kollisionsszenarien lassen sich auf insgesamt 17 relevante Einzelszenarien zurückführen, die in den Tabellen 2–4 dargestellt sind. Die durchgezogene Linie zeigt die Trajektorie des Fahrzeugs mit dem Testsystem, entsprechend zeigt die gestrichelte Linie die Trajektorie des potenziellen Kollisionsgegners. Die dargestellten Szenarien berücksichtigen zwei Kollisionsbeteiligte und vernachlässigen Wende- und Parkmanöver, sowie die Rückwärtsbewegung der Fahrzeuge.

**2.1.2 Kategorisierung**

*Längsverkehr:*

Szenario 1 zeigt einen typischen Auffahrunfall; Szenario 2 stellt den gleichen Unfall bei vorausgegangenem Fahrstreifenwechsel beider Kollisionspartner dar (vgl. Tabelle 2).

Durch die gegensinnige Anordnung der Trajektorien der Beteiligten treten bei Szenario 3 und Szenario 4 vergleichsweise hohe Relativgeschwindigkeiten auf, die besondere Anforderungen an zukünftige Antikollisionssysteme hinsichtlich der Leistung der Sensorik und der Reaktionsstrategie stellen.

*Fahrstreifenwechsel:*

Die Szenarien 5 bis 8 stellen weitere Fahrstreifenwechsellkollisionen dar, die teilweise durch auf dem Markt erhältliche Assistenzsysteme, wie z.B. Audi Side-Assist oder Mercedes-Benz Totwinkel-Assistent abgedeckt werden (vgl. Tabelle 3).

**Tabelle 2:** Kollisionsszenarien Längsverkehr.

Nr.	Szenario
1	
2	
3	
4	

**Tabelle 3:** Kollisionsszenarien Fahrstreifenwechsel.

Nr.	Szenario
5	
6	
7	
8	

**Tabelle 4:** Kollisionsszenarien Kreuzung.

Nr.	Szenario	Nr.	Szenario
9		14	
10		15	
11		16	
12		17	
13			

### *Einbiege-/Abbiege-/Kreuzungsverkehr:*

Die Szenarien 9 bis 17 bilden die Gruppe der Einbiege-, Abbiege- und Kreuzungskollisionen. Da sich die Fahrzeuge mehrheitlich seitlich aufeinander zubewegen, bedarf es eines großen Erfassungsbereichs der Sensorik oder der Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und/oder der Infrastruktur (vgl. Tabelle 4).

## 2.2 Einflussparameter auf Systeme mit Umfelderkennung

Aus System Sicht ist eine große Anzahl von Einflussparametern zu variieren, die von der jeweiligen Sensorkonfiguration und Systemfunktion abhängen.

Da in diesem Ansatz auch zukünftige Systeme berücksichtigt werden sollen, ist es notwendig zunächst zu ermitteln, welche Systeme mit Unfallvermeidungs- oder Unfallfolgenminderungspotenzial mittelfristig in der Entwicklung zu erwarten sind. Hierzu wird im ersten Schritt eine Unfallanalyse durchgeführt, um den Bedarf an Aktiven Sicherheitssystemen zu ermitteln. Daran anschließend werden die für die Funktion notwendige Sensorik, Aktorik und Regelungselektronik ermittelt. Die von der Regelungselektronik benötigten Stimulanzen ergeben die notwendigen Parameter der Funktionalität. Aus den jeweilig ermittelten Schwächen der Baugruppen wird der Prüfbedarf zum Testen der Funktion und der Systemrobustheit abgeleitet. Die Tests des funktionellen Nutzens basieren auf Basisprüfungen, die einen Vergleich der jeweiligen Systemausprägungen ermöglichen.

Im Anschluss an die Ermittlung der systemspezifischen Einflüsse steht die systematische Kombination derselben. Eine vollständige Variation der Parameter ist jedoch nicht handhabbar. Somit werden im Rahmen einer system- und prüfzielspezifischen Bewertung

- die Validität des Tests,
- die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse,
- der sich wiederholende Prüfaufwand und
- die einmaligen Investitionskosten

berücksichtigt.

Die zur Generierung von Prüfverfahren notwendigen Schritte der Konfiguration der Dynamik sowie die Klassifizierung der Einflussparameter werden im Folgenden näher vorgestellt.

### 2.2.1 Dynamikkonfiguration

Der Parameterliste vorgelagert ist die Darstellung der in Abschnitt 2.1 hergeleiteten relativen Bewegung zwischen dem Prüffahrzeug und dem Kollisionsobjekt. Die Definition der jeweiligen Bewegungszustände

- bewegt,
- stehend und
- virtuell

ergibt bei systematischer Kombination neun Konfigurationsmöglichkeiten mit unterschiedlichen Eignungsgraden.

Der Zustand des Prüffahrzeugs wird hierbei von dem Ziel des Tests bestimmt. Die Bewegungsform des Kollisionsgegners bestimmt maßgeblich Form und Funktionalität der Dummytargets und Simulationstools.

### 2.2.2 Einflussparameter

Zur Darstellung sämtlicher Einflussparameter werden die üblichen, auf das Fahrzeug wirkenden Einflussgrößen sowie systemspezifische Parameter betrachtet (siehe Bild 1) und kategorisiert:

- Fahrzeugführung
- Witterung
- Fahrbahn
- Hindernisse
- Fahrdynamik
- ...

Als Fahrzeugführung wird beschrieben, ob und wie das Fahrzeug gefahren bzw. gezogen wird. Ebenfalls der Fahrzeugführung zugeordnet ist die Simulation des Fahrzustandes. Diese Kategorisierung korrespondiert mit der Dynamikkonfiguration.

Neben den üblichen betrachteten Witterungseinflüssen Temperatur, Wind, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag, sind der Kategorie auch Strahlungen und Lichtverhältnisse zugeordnet. So erfolgt eine Variation der Dämmerung und Blendung sowie die Untersuchung der Elektromagnetischen Verträglichkeit nieder-, gleich- und höherfrequenter Strahlung.

Zur Gruppe der Fahrbahneinflüsse werden die Oberflächenmaterialien inklusive inhomogen verteilten Bedeckungen mit verschiedenen Medien zwecks lokaler Reibbeiwertsenkung, die Form der Oberfläche, die Ausrichtung der Straße und gegebenenfalls Fahrbahnmarkierungen und das optische Reflektionsverhalten gezählt.

Die Form und Funktionalität der Hindernisse wird ebenso wie die Fahrzeugführung von der Dynamikkonfiguration beeinflusst. Zusätzlich wird die Ausweichstrategie im Falle einer bevorstehenden Kollision mit dem Prüffahrzeug definiert.

Da Aufbaubewegungen auch Einfluss auf die Sicht der Sensoren haben, werden sie ebenso wie teilverdeckte Hindernisse und vertikale Anregungen abgedeckt.

Sonstige Parameter beschreiben die zusätzlichen sensor-konfigurationsspezifischen Einflüsse wie beispielsweise das Verkratzen von Oberflächen oder Sensordejustagen.

## 2.3 Prüfverfahren

Aus den ermittelten relevanten Kollisionsszenarien und den zugeordneten Einflussparametern werden die notwendigen Prüfverfahren generiert. Im Folgenden werden Beispiele der Prüfverfahren für Frontalkollisionsgegenmaßnahmen betrachtet. Hierunter ist die Gruppe der Systeme zu verstehen, die informierend, warnend oder in die Fahrdyna-

	1	2	3	4	5
Prüffahrzeug	fährt	steht			
Objekt	fährt	wird bewegt	erscheint	steht	virtuell
Objektkollision	virtuell	ausweichen	findet statt	"Schutzengel"	
Eindruck	realistisch	artifiziell			
...					

Bild 2: Klassifizierung der Testdimensionen.

mik eingreifend die Auffahrgefahr bannen sollen oder den Schaden beim Auffahren reduzieren (Collision Mitigation). In einem Morphologischen Kasten (vgl. Bild 2) werden die unterschiedlichen Testdimensionen hierzu beispielhaft klassifiziert.

Als Schutzengel werden im Prüffahrzeug implementierte Kollisionsgegenmaßnahmen bezeichnet.

### 2.3.1 Stand der Technik von Prüfverfahren für Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Die folgenden Beispiele über die ausgeführte Prüftechnik stellen den Stand der Technik bei der Prüfung und Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen dar.

#### *Stehende leichte Hindernisse:*

Stehende Hindernisse stellen die prinzipiell einfachste Form der Prüfung dar. Als maßgebliche Anforderungen an den Dummy stehen die möglichst geringe Masse, um geringe Schäden am Versuchsträger zu gewährleisten, sowie die für Systeme einfach detektierbare Form. Gewährleistet werden diese Forderungen durch leichte Dummies (siehe Bild 3). Die Form orientiert sich an der verwendeten Sensorkonfiguration.

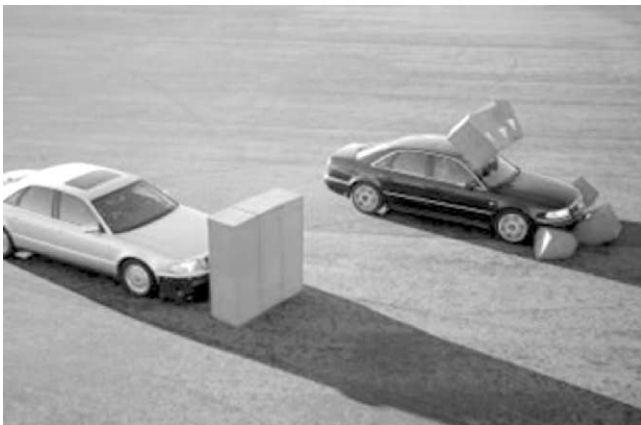


Bild 3: Stehende leichte Hindernisse [5].

#### *Leichte Fahrzeuge:*

Um während der Prüfung fahrdynamische Aspekte wie beispielsweise Aufbaubewegungen durch Beschleunigungen/Bremsen und Kurvenfahrten zu berücksichtigen, werden gepolsterte leichte Fahrzeuge verwendet, die gezogen oder ferngesteuert als Kollisionsobjekte dienen und bei Zusammenstoßen mit niedriger Relativgeschwindigkeit nur geringe Schäden verursachen.

#### *Fahrende Hindernisse, stehendes Prüffahrzeug:*

Durch die Simulation des eigenen Fahrzustandes, beispielsweise durch einen Rollenprüfstand, und die Darstellung der Relativbewegung zum Kollisionsobjekt durch Überlagerung der Trajektorien mittels eines hochagilen Dummy-Targets, werden Kollisionen vermieden und die Reproduzierbarkeit durch den Wegfall einer Fahrereinbindung gesteigert. Dieses Verfahren findet beispielsweise als VEHIL bei TNO Anwendung [6].

#### *Wegklappbare Hindernisse:*

Eine weitere Methode zur kollisionsfreien Prüfung der Systeme stellt das Ausweichen der Hindernisse durch Klapp- und Zugmechanismen dar. Diese Methode ist mittlerweile bei vielen Herstellern und Zulieferern [4; 7] etabliert, bietet aber wenig Potential für den Einsatz im Probandenversuch.

#### *Dynamische Fahrsimulatoren:*

Fahrsimulatoren eignen sich zum Probandenversuch, auch wenn die damit gewonnenen Aussagen nur mit Einschränkungen übertragbar sind. Eine Bewertung von Funktionalität und Robustheit von realen Systemen ist ebenfalls nur eingeschränkt möglich.

#### *Augmented Reality:*

Mittels Augmented Reality werden dem Probanden im realen Fahrzeug bei einer Fahrt über festgelegte Prüfstrecken virtuelle Verkehrsteilnehmer über eine Brille eingeblendet. Dadurch wird ein realistischerer Fahreindruck als im Fahrsimulator erreicht [8], aber auch damit ist ein Test realer Systeme nicht möglich.

### Erscheinende leichte Dummys:

Eine wichtige Voraussetzung für den Test von Antikollisionsystemen, bei denen auch die Fahrerreaktion von Relevanz ist, ist der Überraschungseffekt, da ansonsten keine relevante, kritisch wirkende Situation gegeben ist. Eine Möglichkeit ist das plötzliche Erscheinen aus einer möglichst langen Verdeckung. Natürlich sind die Hindernisse „kollisionsfreundlich“ auszulegen, also sowohl leicht als auch gepolstert zu gestalten. Diese Methode findet in verschiedenen Varianten sowohl im Systemtest als auch im Probandenversuch Anwendung. Allerdings sind diese plötzlich erscheinenden Hindernisse nur repräsentativ für langsame bewegte Kollisionsobjekte.

### Bewegte halbe Fahrzeuge:

Die Darstellung von realistischen Kollisionsobjekten durch halbe Fahrzeuge im Probandenversuch ist ein weiterer Schritt zur dynamischen Darstellung möglichst realistischer Dummytargets.

### 2.3.2 Ausblick

Die gegenwärtigen Prüfverfahren für Frontalkollisionsgegenmaßnahmen verfolgen verschiedene Prüfziele. Jedoch erfolgte bei keinem der Verfahren eine Standardisierung hinsichtlich Gesetzgebung oder Ratinginstitutionen. Um den zukünftig, bedingt durch die zunehmende Markteinführung neuer Systeme, ansteigenden Prüfbedarf abzudecken, sind die folgenden Aspekte bei der Wahl geeigneter Prüfverfahren zu berücksichtigen:

- wirtschaftliche Prüfmethode, deren Durchführung einen geringen Personaleinsatz fordern,
- teilautomatisierte Variation der Prüfparameter zur Verminderung des Prüfaufwandes und zur Steigerung der Reproduzierbarkeit,
- Standardisierung der Prüfverfahren zwecks Nutzennachweis und Produkthaftung,
- Erstellung von Anleitungen zur gezielten Generierung neuer Prüfvorschriften für zukünftige Systeme.

Im folgenden Kapitel werden nun beispielhaft ein auf die Anforderungen der Nutzenermittlung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen entwickeltes neues Testverfahren sowie dessen Validierung gezeigt.

## 3 Beispiel: Darmstädter Test- und Bewertungsverfahren EVITA

### 3.1 Funktionsweise

Wie in den vorausgehenden Abschnitten gezeigt wurde, ist für in kritischen Situationen agierende Fahrerassistenzsysteme kein universell einsetzbares, einfaches Testverfahren für Realfahrten mit fahrenden Hindernissen bekannt, bei dem Probanden ohne Einschränkungen eingesetzt werden können.

Mit dem Werkzeug werden die Bewegungsgrößen eines vorausfahrenden Fahrzeugs aus der stationären Folgefahrt



**Bild 4:** EVITA (bestehend aus Zugfahrzeug und dummy target).

**Tabelle 5:** Leistungsdaten von EVITA.

Maximale Differenzgeschwindigkeit zwischen auffahrendem Fahrzeug und Dummy Target	50 km/h
Maximale Bremsverzögerung des Dummy Target	9 m/s <sup>2</sup>
Kleinste TTC vor einem Versuchende	0,8 s
Übliche Testgeschwindigkeiten (Ausgangsgeschwindigkeit)	50 bis zu 80 km/h

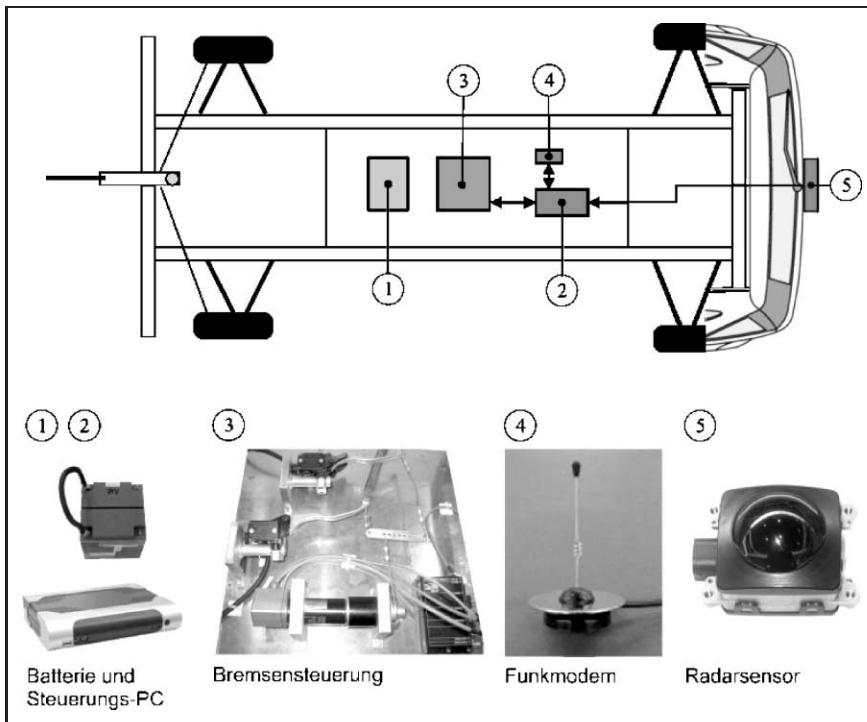
mit einem unerwarteten Bremsmanöver dargestellt. Das realisierte Konzept besteht aus der Kombination eines Zugfahrzeugs, einem Anhänger und einem auffahrenden Fahrzeug. Während der Folgefahrt bremsst der Anhänger (Dummy Target genannt) für den im Versuchsfahrzeug sitzenden Probanden überraschend ab. Unabhängig davon, ob der Proband auf das Manöver rechtzeitig reagiert oder nicht, wird der Anhänger aktiv aus dem Kollisionsbereich gezogen. Bild 4 zeigt das Gespann.

Die im Hinblick auf eine Kollision relevanten Leistungsdaten von EVITA zeigt Tabelle 5. Die Time-to-Collision (TTC) ist hierbei eine abgeleitete Größe, die den Zeitpunkt der drohenden Kollision im unverzögerten Fall beschreibt:

$$TTC = \frac{d}{v_{rel}} [s]$$

### 3.2 Aufbau

Im Heck des Zugfahrzeugs befindet sich eine Seilwinde mit einer reibkraftschlüssigen Windenbremse und einem Elektromotor. Der Anhänger ist mit dem Zugfahrzeug nur über das Seil der Winde verbunden. Das andere Ende des Seils ist an der Achsschenkellenkung der Vorderachse des Anhängers befestigt. Die Scheibenbremsen des Anhängers werden hydraulisch via Handbremshebel von einem Elektromotor betätigt. Im hinteren Bereich des Anhängers befindet sich eine originale Heckansicht einer Mercedes A-Klasse. An diesem Heck ist ein Radarsensor befestigt. Im Zugfahrzeug und im Anhänger befinden sich Rechner,



**Bild 5:** Aufbau und Komponenten des Dummy Target.

die durch Funkmodems miteinander verbunden sind. Die Gesamtmasse des Dummy Target beträgt 180 kg. Bild 5 zeigt dessen Aufbau.

### 3.3 Versuchsablauf

Im Ausgangszustand ist der Anhänger hinter dem Zugfahrzeug kurzgekoppelt. Wird vom am Anhängerheck montierten, rückwärtig messenden Radar ein Fahrzeug in passendem Versuchsabstand detektiert, kann das Gesamtsystem für eine Versuchsdurchführung aktiviert werden. Auf Befehl des Bedieners im Zugfahrzeug öffnet sich die Bremse der Seilwinde, und die Bremsen des Anhängers werden betätigt. Das Zugfahrzeug fährt während dieses Vorgangs mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Durch das Bremsen des Dummy Target wickelt sich das Seil der Winde ab. Während der Anhänger verzögert, berechnet die Verarbeitungseinheit des Abstandssensors permanent die TTC.

Unterschreitet diese einen festgelegten Wert, schließt die Seilwindenbremse im Zugfahrzeug, und der Anhänger beschleunigt auf das mit konstanter Ausgangsgeschwindigkeit fahrende Zugfahrzeug. Innerhalb von weniger als einer Sekunde wird der Anhänger bei maximaler Differenzgeschwindigkeit wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit des Zugfahrzeugs beschleunigt. Nach der Beendigung des Versuchs bremst das gesamte Gespann bis zum Stillstand ab.

### 3.4 Bewertungsverfahren für Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Für die Beurteilung der Wirksamkeit von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wird ein Beurteilungszeitraum festgesetzt. Der Zeitraum beginnt mit dem Zeitpunkt des Auslösens einer Warnung oder eines Fahrzeueingriffs. Der

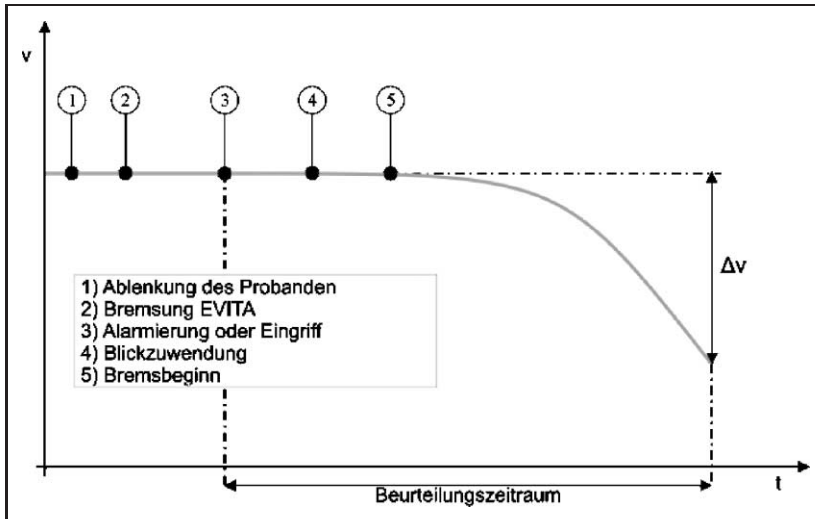
Beurteilungszeitraum endet zum Zeitpunkt eines gedachten, ungebremsten Aufpralls des Versuchsfahrzeugs auf das vorausfahrende, ununterbrochen bremsende Dummy Target. Dieser Aufprall ist „fiktiv“, da von EVITA automatisch eine Kollision vermieden wird. Der Endzeitpunkt wird in Abhängigkeit des TTC-Algorithmus und der Auslöschwelle in einem ungebremsten Eichversuch ohne Proband bestimmt. Für eine typische Warnung mit dem TTC-Algorithmus beträgt der Betrachtungszeitraum 2 s. Die Warnschwelle wurde unter Kenntnis von Warnzeitpunkten bekannter Frontalkollisionsgegenmaßnahmen definiert. So können Warnelemente sowohl miteinander als auch mit autonomen Bremsingriffen verglichen werden.

Zur Bestimmung der Wirksamkeit wird die Geschwindigkeit des Probandenfahrzeugs zu Beginn und am Ende des Beurteilungszeitraums gemessen und die Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v$  gebildet. Bild 6 zeigt den Beurteilungszeitraum.

### 3.5 Vergleiche von Antikollisionssystemen

Das einheitliche Bewertungsverfahren ist Grundlage für den Vergleich verschiedener Ausprägungen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Für die Bewertung werden mit einem Kollektiv von Probanden Testfahrten durchgeführt, wobei der Vergleich der Verteilungen der ermittelten Geschwindigkeitsreduktionen im Beurteilungszeitraum die Wirksamkeit der Varianten wiedergibt.

Eine Beurteilung der absoluten Wirksamkeit eines Antikollisionssystems ist durch die Verwendung einer sogenannten Baseline zu erreichen. Dabei wird ein Teil des Probandenkollektivs ohne einen Eingriff des Antikollisionssystems mit der kritischen Situation konfrontiert und beispielsweise die Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt.



**Bild 6:** Idealisierter Versuchsablauf als Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit des Versuchsfahrzeugs mit Beurteilungszeitraum und Geschwindigkeitsdifferenz.

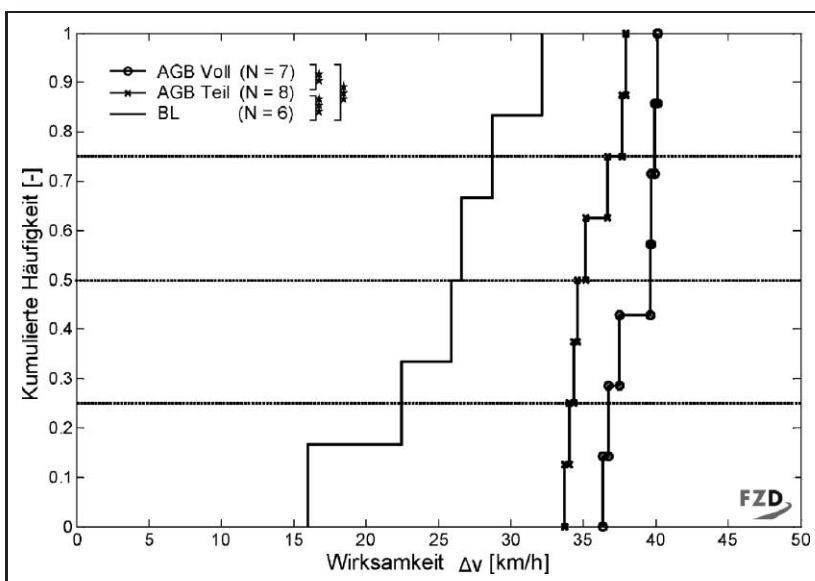
Für die Bewertung der Wirksamkeit des Antikollisionssystems ist nur der erste Versuch des Probanden eine unbeeinflusste Basis. Bei allen weiteren Versuchen hat der Proband trotz einer lückenhaften Vorinformation über den eigentlichen Zweck der Versuche den Versuchsgegenstand einer überraschenden Notsituation verstanden, er gilt nun als voreingenommen. Die weiteren Versuche nach der ersten Notsituation eignen sich zur Untersuchung weiterer Fragestellungen, wie etwa der Umgang mit Fehlwarnungen oder die vergleichende Probandeneinschätzungen zu Varianten von Antikollisionssystemen. Die Einschätzung von Probanden zur erlebten Situation und zur Bewertung von Fahrerwarnelementen wird mit Fragebögen abgefragt. Aus der Auswertung dieser Fragebögen lassen sich Hinweise zur Gestaltung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ziehen.

### 3.6 Validierung und Ergebnisse

In zwei Forschungsprojekten in Kooperation mit Honda R&D Deutschland und der Forschungsinitiative „Aktiv“ [9]

wurden verschiedene Ausprägungen von Antikollisionssystemen entwickelt und bewertet, wozu umfangreiche Versuche mit einer Anzahl von insgesamt rund 250 Probanden durchgeführt wurden. Für die Übertragung der Erkenntnisse auf die Realität kommt der Evaluierung des Versuchsaufbaus eine große Bedeutung zu. Die Auswertung der Versuche zeigt, dass sich bei gewöhnlicher Folgefahrt keine Auffälligkeiten im Fahrverhalten der Probanden erkennen lassen, die auf den Versuchsaufbau zurückzuführen sind. Bestätigt wird diese Erkenntnis durch die per Fragebögen erhobene Einschätzung der Probanden. Somit ist das Ziel, eine negative Beeinflussung der Probanden durch den Versuchsaufbau zu verhindern, erreicht.

Es zeigt sich im Versuch, dass mit der hier beschriebenen Test- und Bewertungsmethode zum Teil höchstsignifikant unterschiedliche Urteile in den Bewertungskenngrößen sowohl auf Basis objektiver Fahrzeugmessgrößen als auch in den Probandenurteilen ermitteln lassen. Bild 7 zeigt exemplarisch die Wirksamkeiten unterschiedlicher Verzögerungsvarianten einer Aktiven Gefahrenbremsung (AGB) im LKW und Baseline (BL) ohne Unterstützung.



**Bild 7:** Wirksamkeit unterschiedlicher Varianten von Aktiven Gefahrenbremsungen (AGB) im LKW und Baseline (BL) ohne Unterstützung.



Voll:  $7 \text{ m/s}^2$ , Teil:  $4 \text{ m/s}^2$ ) sowie die Wirksamkeit ohne Unterstützung (Baseline) für einen LKW-Versuchsträger, ausgedrückt durch den Geschwindigkeitsabbau innerhalb des Beobachtungszeitraumes. Die Ergebnisse aus der Anwendung der Methode in beiden Studien sind in weiteren Publikationen [10–14] detailliert dargestellt.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Angesichts der beschriebenen einerseits zahlreichen und andererseits stark unterschiedlichen Anforderungen an die Prüftechnik sowohl aus System- als auch aus Manöversicht, erscheint es unmöglich, mit nur einem Prüfverfahren eine hinreichende Abdeckung zu erreichen.

Vor dem Hintergrund wirtschaftlicher Aspekte kann aber auch nicht für jede Fragestellung ein eigenes Prüfwerkzeug entwickelt werden. Es ist deshalb sinnvoll z. B. durch den hier gezeigten methodischen Ansatz Klarheit darüber zu schaffen, welcher Prüfbedarf voraussichtlich entstehen wird und welche Einzelprüfungen sich daraus ableiten. Dabei konnte im Rahmen dieses Artikels gezeigt werden, dass sich auch eine unüberschaubare Anzahl an komplexen Parametern durch methodische Reduktion auf ein handhabbares Maß an Prüfungen einschränken lässt. Ziel der Prüfwerkzeugentwicklung für die hier betrachteten Sicherheitssysteme auf der Bahnführungsebene ist, ähnliche Prüfverfahren zu identifizieren, um durch „Umsetzung des kleinsten gemeinsamen Nenners“ an Prüfausstattung das „größte gemeinsame Vielfache“ bezüglich der darstellbaren Einzelprüfungen zu erreichen. Angesichts des hohen Test- und Bewertungsbedarfs ist zu erwarten, dass künftig zunehmend der Testaufwand den Zeitpunkt der möglichen Produkteinführung bestimmen wird. Erfolgreich wird sein, wer frühzeitig den Nutzen der Funktion mit hoher Effizienz im Probandentest bewerten und optimieren kann und darüber hinaus die im späteren Alltagseinsatz auftretenden Funktionseinschränkungen durch Störungen rechtzeitig im Labor zu beherrschen lernt.

## Literatur

- [1] E. Donges: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug, Zeitschrift für Verkehrssicherheit 24, 1978.
- [2] M. Maurer, W. Geißler: Adaptive Cruise Control. – In: ATZ – extra – Der neue Audi A4, September 2007, S. 148–151.
- [3] K. Kodaka, M. Otabe, Y. Urai, H. Koike: Honda Rear-End Collision Velocity Reduction System. SAE 2003-01-0503, 2003.

- [4] www.mercedes-benz.de, 06.05.08.
- [5] www.volkswagen-media-services.com, 06.05.08.
- [6] www.tno.nl, 06.05.08.
- [7] www.conti-online.de, 06.05.08.
- [8] T. Bock: Verfahren zur Funktionsprüfung eines kraftfahrzeugseitig integrierten Fahrerassistenzsystems, Patent Nr. DE102004057947A1, 08.06.2006.
- [9] www.aktiv-online.org, 06.05.08.
- [10] J. Hoffmann, H. Winner: EVITA – Das Untersuchungswerkzeug für Gefahrensituationen, 3. Tagung aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching, April 2008.
- [11] J. Hoffmann, H. Winner: Die Prüfmethode für Antikollisionssysteme, 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting, 02.–04.04.2008.
- [12] H. Winner, J. Hoffmann, F. Regh, N. Fecher: Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen – Status Quo, Tagung Integrated Safety, Hanau, 01.–02.07. 2008.
- [13] J. Hoffmann, H. Winner: EVITA – The Testing Method for Collision Warning and Collision Avoidance Systems, FISITA 2008, F2008-12-019.
- [14] N. Fecher, K. Fuchs, J. Hoffmann, B. Abendroth, R. Bruder, H. Winner: Analysis of the driver behavior in autonomous emergency hazard braking situations, FISITA 2008, F2008-02-030.

Manuskripteingang: 9. Juni 2008.

---

**Dr.-Ing. Norbert Fecher** arbeitet seit 2004 als Oberingenieur am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt und leitete seither verschiedene Projekte aus dem Bereich Fahrerassistenz. Er promovierte 2005 mit einer Arbeit über das Abstandsverhalten von Fahrzeugführern.

Adresse: Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, Petersenstraße 30, 64287 Darmstadt, E-Mail: fecher@fzd.tu-darmstadt.de

**Dipl.-Ing. Stefan Habenicht** arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt. In seiner Forschungstätigkeit beschäftigt er sich mit dem Test- und der Bewertung von aktiven Sicherheitssystemen.

Adresse: wie oben, E-Mail: habenicht@fzd.tu-darmstadt.de

**Dipl.-Ing. Jens Hoffmann** war bis Juni 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik und hat das Darmstädter Test- und Bewertungsverfahren EVITA entwickelt. Dieses wurde in zwei Kooperationsprojekten mit Honda R&D sowie der Forschungsinitiative Aktiv angewendet.

Adresse: wie oben, E-Mail: hoffmann@fzd.tu-darmstadt.de

**Dipl.-Ing. Fabian Regh** arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt. In seiner Forschungstätigkeit beschäftigt er sich mit dem Prüfbedarf künftiger Systeme der Integralen Sicherheit und deren Umsetzung.

Adresse: wie oben, E-Mail: regh@fzd.tu-darmstadt.de

**Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner** leitet das Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt. Schwerpunkte der Forschung sind Fahrerassistenzsysteme, die mechatronischen Fahrwerksysteme, die fahrdynamischen Wechselwirkungen und Motorsicherheit.

Adresse: wie oben, E-Mail: winner@fzd.tu-darmstadt.de