



Anja Schneider (Autor)  
**Feldefektivitätsanalyse integraler  
Sicherheitssysteme**

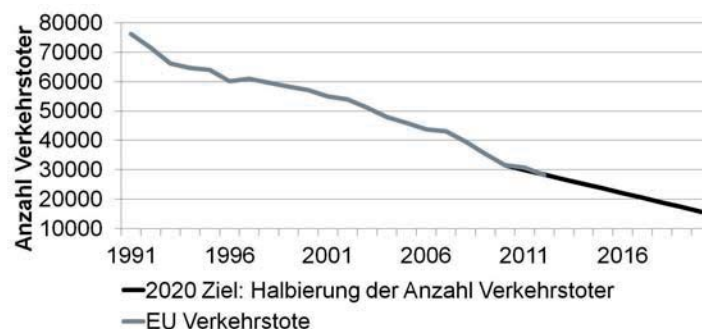


<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6959>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Verkehrsunfälle sind weltweit gesehen auf Platz 8 der häufigsten Todesursachen [Who13]. Im Jahr 2010 starben über 1,24 Mio. Menschen bei Verkehrsunfällen. In der Gruppe der 15 bis 29 Jährigen sind sie noch immer auf Platz 1 der häufigsten Todesursachen. Dabei zeigen sich die höchsten Getötetenraten in den sog. "middle-income countries" wie der afrikanischen Region. Schlüsselfaktoren sind hierbei unangepasste Geschwindigkeit, Alkohol, die Nutzung von Motorradhelmen und Gurten und die richtige Verwendung von Kindersitzen.



**Abbildung 1.1:** Anzahl der Verkehrstoten 1990 - 2012 in der EU [Ec13]

Dem gegenüber stehen sinkende Zahlen bei den Verkehrstoten in Europa (siehe Abbildung 1.1). Bereits zwischen 2000 und 2010 konnte die Zahl der Verkehrstoten - wie im Weißbuch [Kom01] gefordert - um fast 50% reduziert werden und eine weitere Halbierung bis 2020 wird bereits angestrebt [Kom11]. Die oben genannten Schlüsselfaktoren können auch in Europa noch für eine weitere Reduktion der Verkehrstoten sorgen. Während in Deutschland die Gurtragequote auf 95 % bei den vorderen und auf 75 % bei den hinteren Sitzen geschätzt wird, liegt der europäische Mittelwert für Frontinsassen nur bei 76 %, respektive 46 % bei Fondinsassen [Ets03]. Eine Erhöhung der Gurtragequote in Europa auf durchschnittlich 97 % auf den vorderen Sitzen kann Schätzungen aus dem Jahr 1997 zu Folge 4.826 Menschenleben retten.

## 1.1 Motivation

Aktuell sind Fahrzeuge hauptsächlich mit passiven Sicherheitssystemen ausgestattet. Zu dieser Art der Sicherheitssysteme zählen beispielsweise Airbags oder Gurtkraftbegrenzer. Sie sollen im Fall einer Kollision den Insassen zurückhalten und für eine möglichst geringe Belastung sorgen. Die Belastung in Form von auf den Insassen wirkenden Beschleunigungen oder Kräften wiederum dient als Indikator für die Verletzungsschwere der Insassen. Um die Wirksamkeit solcher Systeme zu bewerten, werden die Fahrzeuge verschiedensten Crashtests unterzogen. Tabelle 1.1 zeigt eine Übersicht von Frontal- und Seitenkollisionen, die im

**Tabelle 1.1:** Übersicht über Front- und Seitencrashtests im Euro NCAP und US NCAP Test

	Full Width	Offset Deformable Barrier (ODB)	Moving Deformable Barrier (MDB)	Pole
Euro NCAP				
US NCAP				

Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) und US NCAP getestet und bewertet werden. Bei den Frontalkollisionen werden neben Full Width Tests, bei denen das Fahrzeug frontal mit voller Überdeckung gegen eine starre Barriere gefahren wird, auch teilüberdeckte Konstellationen getestet. Bei diesen Offset Deformable Barrier (ODB) Tests, kollidiert das Fahrzeug mit 40% Überdeckung gegen eine deformierbare Barriere. Bei den Seitenkollisionen wird zwischen Tests mit Moving Deformable Barriers (MDB), bei denen eine mobile Barriere gegen die Seite des Fahrzeugs kollidiert, und Pole-Tests unterschieden. Bei

## 1.1 MOTIVATION

---

diesen Tests wird ein Pfahl gegen die Seite des Fahrzeugs gezogen. Eine Auflistung verschiedenster Crashlastfälle aus Gesetz und Verbraucherschutz findet sich für Frontalkollisionen in Anhang A und für Seitenkollisionen in Anhang B.

Abbildung 1.2 zeigt eine teilüberdeckte Frontalkollision gegen eine deformierbare Barriere.



**Abbildung 1.2:** Teilüberdeckter Frontcrash gegen eine deformierbare Barriere inklusive überlagerter Struktur- und Insassensimulation

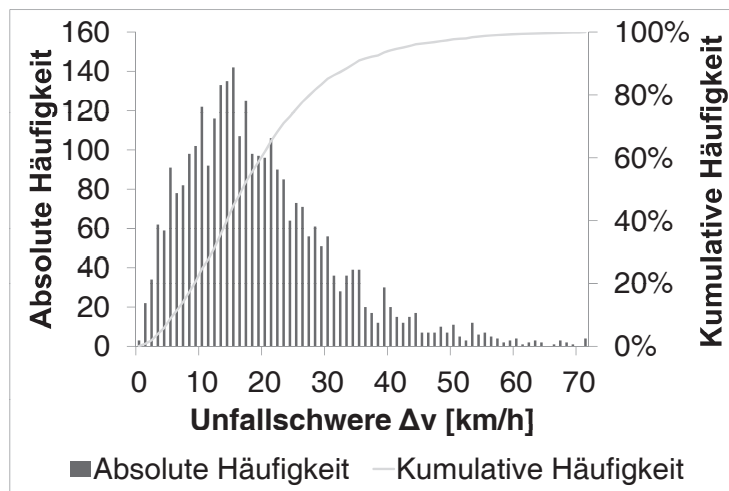
Durch die Überdeckung soll ein auf der Gegenfahrbahn befindliches Fahrzeug abgebildet werden, das während des Aufpralls ebenfalls deformiert. Ebenso werden Crashtests mit voller Überdeckung gegen eine starre Wand durchgeführt. Diese Art der Kollision ist ein Stellverteter für einen vollüberdeckten Gegenverkehrsfall mit doppelter Relativgeschwindigkeit gegen ein baugleiches Fahrzeug. Neben flächigen Barrieren werden auch Pfähle als Kollisionsgegner getestet, um beispielsweise Kollisionen mit Bäumen nachzubilden.

Die Belastungen, die am Dummy als Stellvertreter des Menschen gemessen werden, dürfen definierte gesetzliche Grenzwerte nicht übersteigen. Diese Grenzwerte entsprechen gewissen Verletzungsrisiken. Die im US-Gesetz FMVSS 208 (Federal Motor Vehicle Safety Standard) maximal zulässige Eindrückung der Brust von 63 mm für einen durchschnittlich großen Mann entspricht beispielsweise einem Risiko von 50%, dass der Insasse in diesem Unfall eine schwere Brustverletzung erleidet. Dazu zählen unter Anderem Rippenserienfrakturen, also Frakturen von mehr als drei nebeneinander liegenden Rippen.

Neben den gesetzlichen Craschanforderungen existieren Ratingverfahren, wie z. B. das European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), die meist strengere Anforderungen bezüglich der Belastungsgrenzwerte beinhalten und den Kunden durch eine vergleichende Bewertung verschiedener Fahrzeuge bezüglich ihrer Sicherheit bei der Kaufentscheidung unterstützen sollen. Derartige Testverfah-

ren werden bereits seit Jahrzehnten durchgeführt und haben zu einer deutlichen Steigerung des Sicherheitsniveaus der Fahrzeuge geführt.

Neben realen Crashtests werden diese definierten Lastfälle auch simulativ betrachtet. In Abbildung 1.2 sind der reale Crashtest und die dazugehörige Struktur- und Insassensimulation überlagert. Mit Hilfe der Simulationen können virtuell die Belastungen des Dummys bestimmt werden. Gerade in Zeiten immer kürzer werdender Produktentwicklungsprozesse und steigender Anzahlen von Fahrzeugderivaten wäre eine reale Absicherung jeder einzelnen Modellvariante in realen Crashtests extrem zeit- und kostenaufwändig. Durch den Einsatz hochgenauer Simulationen kann der Entwicklungsaufwand deutlich reduziert werden.



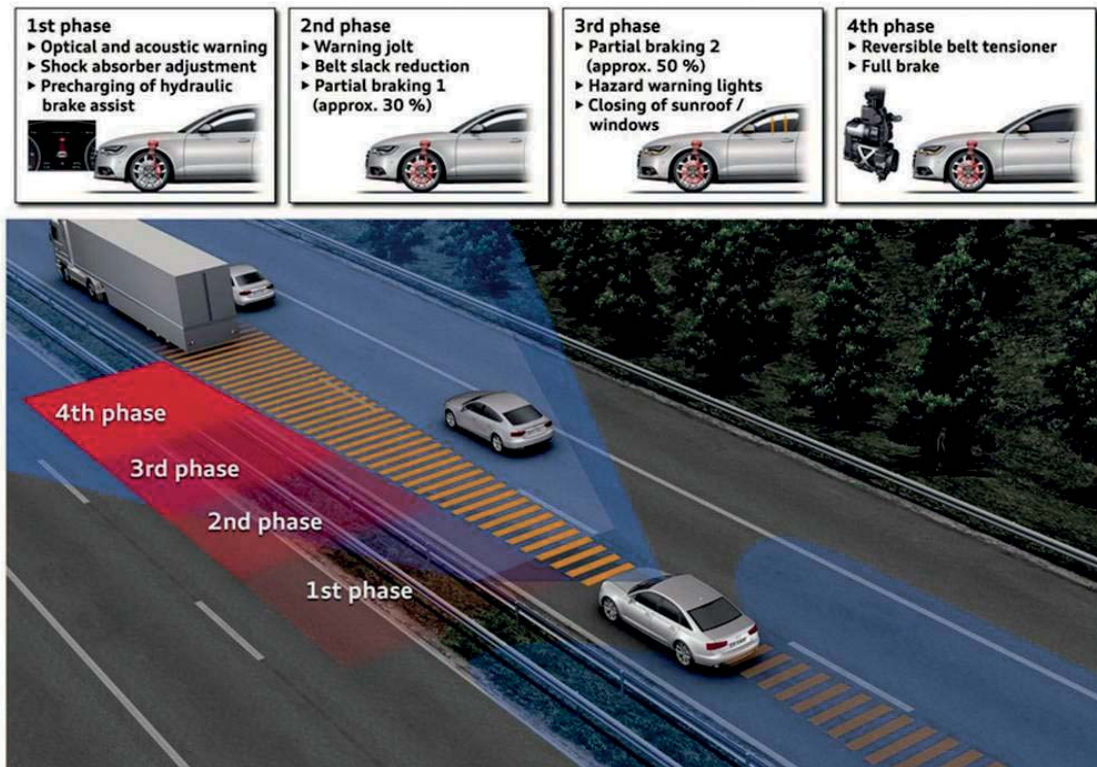
**Abbildung 1.3:** Absolute Häufigkeiten und kumulative Verteilung der Unfallschwere bei PKW-PKW-Kollisionen in GIDAS

Ein Großteil der betrachteten Crashtests repräsentiert Unfälle mit sehr hohen Unfallschweren. Abbildung 1.3 zeigt die kumulative Verteilung der Unfallschweren in der Unfalldatenbank GIDAS (German In-Depth Accident Study, siehe Kapitel 3.4) bei PKW-PKW-Kollisionen. Ungefähr 99% der betrachteten Kollisionen haben demnach eine geringere Unfallschwere als die vorgeschriebenen Crashtests [Res11].

Neben passiven Sicherheitssystemen werden aktive Sicherheitssysteme immer wichtiger. Derartige Systeme greifen auf Basis von Umfeldinformationen bereits vor der Kollision ein und können dadurch nicht nur die Unfallschwere reduzieren, sondern Kollisionen gänzlich vermeiden. Zu den aktiven Systemen zählen beispielsweise automatische Notbremsysteme, die mit Hilfe von Sensorik das Umfeld erfassen und darauf basierend über ein automatisches Bremsmanöver

## 1.1 MOTIVATION

entscheiden. Für solche Systeme gibt es aktuell noch keine gesetzlich vorgeschriebenen Tests bezüglich einer Bewertung ihrer Wirksamkeit. Erste Ansätze zur Bewertung werden im Rahmen von Ratingverfahren wie dem Euro NCAP in internationalen Gremien diskutiert. Diese Bewertungsverfahren bestehen aus Fahrversuchen, in denen definierte Unfalleinlaufsznarien nachgebildet werden. Eine Bewertung erfolgt auf Basis der reduzierten Kollisionsgeschwindigkeit. Die vielversprechendste Entwicklung in der Fahrzeugsicherheit sind sogenann-



**Abbildung 1.4:** Funktionsskizze eines Notbremssystems am Beispiel des Audi pre sense front nach [Car11b]

te integrale Sicherheitssysteme. Derartige Systeme stellen eine intelligente Verknüpfung aktiver und passiver Systemkomponenten dar. In der vor-kollisionären Phase entscheidet ein aktives System auf Grund von Umfeldinformationen über die Auslösung einer Warnung oder einen aktiven Systemeingriff (wie z. B. eine Bremsung). Gleichzeitig werden die Umfeldinformationen dazu genutzt, die drohende Kollision früher zu erkennen, ihre Schwere abzuschätzen und dadurch die passiven Systemkomponenten (wie z. B. Gurtkraftbegrenzer) in ihrer Rückhalteleistung optimal an die jeweilige Unfallsituation und den Insassen anzupassen. Ein Beispiel eines derartigen Systems ist mit dem System „pre sense front“ von Audi in Abbildung 1.4 dargestellt. Zunächst erhält der Fahrer in einer kritischen Situation eine Warnung. Auf Grund der vorliegenden Kritikalität werden die Aus-



---

löseschwellen des Bremsassistenten angepasst. Sollte der Fahrer eine Bremsung initiieren, wird diese sofort verstärkt und der benötigte Bremsweg minimiert. Reagiert der Fahrer nicht, erhält er nochmals eine Warnung. Gleichzeitig wird die Gurtlose reduziert und eine erste Teilbremsung eingeleitet. Führen auch diese Aktionen zu keiner Reaktion, wird die Teilbremsung verstärkt und der Folgeverkehr wird durch Warnblinken gewarnt. Kurz vor der Kollision wird schließlich eine Vollbremsung eingeleitet und der Gurt reversibel gestrafft. Dadurch wird der Insasse für den Crash positioniert und die Rückhaltesysteme haben im Crash mehr Vorverlagerungsweg zur Verfügung, wodurch sie den Insassen besser schützen können.

Durch die Vernetzung der aktiven und passiven Komponenten zu integralen Systemen ist es möglich, Kollisionen gänzlich zu vermeiden, den Fahrer zu warnen, Unfallschweren zu mindern und - im Fall einer Kollision - dem Insassen größtmöglichen Schutz zu bieten.

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Für die Entwicklung und Optimierung integraler Systeme hinsichtlich des realen Unfallgeschehens wird ein Bewertungsverfahren benötigt, das die Effektivität dieser Systeme ermittelt. Als Effektivität wird dabei die Reduktion Verletzter und Getöteter im realen Unfallgeschehen bezeichnet.

Aktuell können integrale Systeme aber weder mit Hilfe definierter Crashtests, noch mit Hilfe der Fahrversuche abgetestet werden. Crashtests auf der einen Seite decken nur sehr hohe Unfallschweren ab. Für diese Unfallschweren sind bereits aktuelle passive Systeme optimal ausgelegt. Ein integrales System, das beispielsweise seine Rückhalteleistung an die Unfallschwere anpasst, würde bei hohen Unfallschweren dieselbe Rückhalteleistung anfordern wie ein konventionelles passives System. Somit werden beide Systeme gleich bewertet, obwohl sie im realen Unfallgeschehen zu stark unterschiedlichen Ergebnissen führen. Die Fahrversuche auf der anderen Seite sind zeit- und kostenaufwändig und dadurch in ihrer Anzahl stark eingeschränkt. Dem hingegen ist das reale Unfallgeschehen sehr vielfältig. Beispielsweise führen unterschiedliche Sichtbedingungen zu unterschiedlichen Auslöseentscheidungen und dadurch auch zu stark differierenden Systemwirkungen. Zudem werden diese Fahrversuche Kollisionsvermeidend ausgeführt. Dadurch kann wiederum nicht gezeigt werden, welchen Einfluss gerade das Zusammenspiel der unterschiedlichen Systemkomponenten auf die Verletzungsschwere der Insassen hat.



## 1.2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

---

Somit ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Methode, die eine Bewertung integraler Sicherheitssysteme in PKW-PKW-Kollisionen auf Basis des realen Unfallgeschehens hinsichtlich der Verletzungsschwere der Insassen ermöglicht. Die Methode soll modular aufgebaut sein und dadurch sehr hohe Flexibilität ermöglichen. Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen für das Bewertungsverfahren definiert. Anhand dieser Rahmenbedingungen werden in Kapitel 2.5 die im Stand der Technik vorgestellten Bewertungsverfahren beurteilt.

- **Datenbasis:** Die zu bewertenden Systeme sind sehr stark abhängig von der jeweiligen Unfallsituation. So wird z. B. die Sensorperformance stark durch das jeweilige Szenario beeinflusst. Sichtverdeckungen können beispielsweise zu einer verspäteten Auslösung führen. In Abhängigkeit des vorliegenden Reibwerts können Systeme, die die Fahrdynamik beeinflussen, sehr unterschiedlich wirken. Auch für unfalladaptive Systeme, die ihre Wirkung an die vorliegende Unfallschwere anpassen, ist es essentiell, in welcher Unfallsituation sich das Fahrzeug befindet und welcher Insasse im Fahrzeug sitzt. Für eine Bewertung solcher Systeme ist somit eine möglichst detaillierte und statistisch repräsentative Unfalldatenbasis zu wählen. Dadurch soll eine Bewertung erzeugt werden, die den vollen Funktionsumfang testet und die Relevanz der Unfallszenarien im realen Unfallgeschehen berücksichtigt.
- **Systeme:** Es sollen sowohl aktive, passive, als auch integrale Systeme bewertet werden. Dadurch wird eine vergleichende Bewertung verschiedener Systemlösungen möglich.
  - **Aktive Systeme:** Das Bewertungsverfahren muss in der Lage sein, komplexe aktive Systeme möglichst realitätsnah abzubilden. Viele aktive Systeme beinhalten Warnungen, die als Aktor den Fahrer ansteuern. Um diese Warnung bewerten zu können, muss die Fahrerreaktion abgebildet werden. Gleichzeitig muss bei der Bewertung die Veränderung der Trefferlagen durch einen aktiven Systemeingriff berücksichtigt werden. Da die Unfallschwere  $\Delta v$  maßgeblich die Verletzungen der Insassen bestimmt, muss dieser Parameter innerhalb der Methode bestimmt werden. Neben der Unfallvermeidung soll auch eine Unfallschwereminderung, z. B. durch einen automatischen Bremsengriff, berücksichtigt werden. Zudem sollen auch regelnde Systeme bewertet werden.
  - **Passive Systeme:** Die Methode muss die Auswirkungen verschiedener passiver Systeme auf die Verletzungsschwere der Insassen ermit-



---

teln können. Dabei sollen neben physikalischen Parametern (wie z. B. Geschwindigkeiten oder Auslösezeiten) auch anthropometrische Parameter der Insassen (wie z. B. Größe und Gewicht) berücksichtigt werden, um Insassen-adaptive Systeme (also Systeme, die ihre Wirkung an den Insassen anpassen) bewerten zu können.

- **Integrale Systeme:** Integrale Systeme stellen eine Vernetzung aktiver und passiver Komponenten dar. Die Methode soll die Wechselwirkungen der Systemkomponenten integraler Systeme bewerten können. Beispielsweise soll bei der Bewertung eines Unfallschwere-adaptiven Systems (also eines Systems, das seine Wirkung an die Unfallschwere anpasst) die Reduktion der Unfallschwere durch eine automatische Bremsung, die daraus resultierende veränderte Trefferlage und die angepasste Wirkung von Gurt und Airbag berücksichtigt werden.
- **KenngroÙe der Bewertung:** Die Bewertung soll anhand einer objektiven KenngroÙe erfolgen. Diese KenngroÙe wird durch die Feldeffektivität repräsentiert. Sie bezeichnet die prozentuale Reduktion Verletzter und Getöteter im realen Unfallgeschehen.
- **Bestimmung der Verletzungsschwere:** Die Bestimmung der Verletzungsschwere soll sich an aktuellen gesetzlichen Vorgaben und Rating-Verfahren orientieren. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Bewertung so nah wie möglich an den aktuell vorgeschriebenen Bewertungsverfahren ansetzt. Gleichzeitig wird für eine ganzheitliche Bewertung von Sicherheitssystemen ein Gesamtverletzungsrisiko benötigt, damit bei der Entwicklung von Sicherheitssystemen die Wechselwirkungen zwischen den System-induzierten Kinematikveränderungen einzelner Körperregionen berücksichtigt werden.
- **Entwicklungsstand der zu bewertenden Systeme:** Die zu bewertenden Systeme sind oft nur teilweise und in kleinem Maßstab im Markt verbreitet. Deshalb muss das Bewertungssystem auch in der Entwicklung befindliche Systeme bewerten können, um eine Entwicklung möglichst sicherheitseffizienter Systeme gewährleisten zu können.
- **Aufwand der Bewertung:** Die Methode soll möglichst zeit- und kosteneffizient arbeiten. Da Systeme verschiedener Entwicklungsstände betrachtet werden, soll der Aufwand für die Bewertung skalierbar sein.
- **Hochrechnung:** Die Effektivität soll auf Bundesebene ausgewiesen werden. Aus diesem Grund wird eine Hochrechnung auf die amtliche Verkehrsunfallstatistik benötigt.

Mit Hilfe der Methode soll zum Einen der Funktionsentwickler bereits im laufenden Entwicklungsprozess unterstützt werden, indem er die Wirksamkeit sei-



nes Systems im realen Unfallgeschehen ermitteln kann. Dadurch können sowohl unterschiedliche Systeme verglichen, als auch der Entwicklungsfortschritt dokumentiert werden. Zum Anderen soll die Methode von Gesetzgebern und Rating-Agenturen verwendet werden, damit aktive, passive und integrale Sicherheitssysteme nach einem Maßstab bewertet werden können. Auf dieser Basis kann somit eine Reduzierung der Verletzten und Getöteten im realen Unfallgeschehen weiter forciert werden.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode zur Bewertung der Feldeffektivität integraler Sicherheitssysteme auf Basis des realen Unfallgeschehens in PKW-PKW-Kollisionen entwickelt.

In Kapitel 2 wird zunächst ein Überblick über die Geschichte der Fahrzeugsicherheit gegeben. Daraufhin wird der Unfallentstehungsprozess definiert und aktive, passive und integrale Systeme werden in diesen Prozess eingeordnet. Weiterhin werden einige Beispiele derartiger Systeme in ihrer Wirkweise beschrieben. Zudem wird der Stand der Technik zur Bewertung von Sicherheitssystemen dargestellt. Dabei wird zum Einen nach der Art der Systeme unterschieden, zum Anderen nach der grundlegenden Methode der Bewertung. Abschließend werden die vorgestellten Methoden diskutiert und Anforderungen an ein neues Bewertungsverfahren für integrale Sicherheitssysteme abgeleitet.

Um das reale Unfallgeschehen abbilden zu können, werden Unfalldaten benötigt. Dazu werden in Kapitel 3 verschiedene Unfalldatenbanken vorgestellt und bezüglich ihrer Verwendbarkeit im Rahmen der Methode analysiert.

Ausgehend von den ermittelten Anforderungen wird in Kapitel 4 eine Methode zur Bewertung integraler Sicherheitssysteme abgeleitet. Diese Methode gliedert sich in drei Schritte. Im ersten Schritt wird eine Unfalldatenbank ausgewählt. Um das darin beschriebene Unfallgeschehen besser handhaben zu können, werden die Daten aufbereitet. Weiterhin werden Stellvertreter szenarien abgeleitet, anhand derer im zweiten Schritt die Wirkung aktiver, passiver und integraler Systemkomponenten simuliert wird. Dazu werden die einzelnen Szenarien in aus System-sicht ähnliche Szenarien zusammengefasst. Hierfür werden die in der Unfalldatenbank enthaltenen Parameter bezüglich ihres Einflusses auf die Unfallschwere analysiert. Die relevantesten Parameter werden daraufhin verwendet, um die Datenbank zu clustern. Für jedes Cluster wird schließlich der statistisch relevanteste



---

Realunfall ausgewählt und als Stellvertreter für die folgenden Insassensimulationen verwendet.

Im zweiten Schritt wird die Wirkung der einzelnen Systemkomponenten mit Hilfe verschiedener Simulationsmethoden abgebildet. Dabei wird zwischen den aktiven Systemkomponenten, die die Fahrdynamik beeinflussen, und den passiven Systemkomponenten, die die Kinematik des Insassen während der Kollision beeinflussen, unterschieden. Zudem werden Möglichkeiten dargestellt, reale Versuchsergebnisse in die Methode einzubinden. Im dritten Schritt werden die aus den Simulationen ermittelten Veränderungen der Unfallsituationen durch die Eingriffe der Systemkomponenten in Verletzungsrisiken transformiert. Die Risiken werden auf das amtliche deutsche Verkehrsunfallgeschehen hochgerechnet. Somit kann eine Effektivität auf Bundesebene für integrale Systeme ausgewiesen werden.

Abschließend wird die vorgestellte Methode in Kapitel 5 anhand einiger Beispiele diskutiert. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel wird zunächst ein kurzer Überblick über die Historie der Fahrzeugsicherheit gegeben. Daraufhin wird der Stand der Technik bei Assistenz- und Sicherheitssystemen erläutert (siehe Kapitel 2.3). Basierend auf den zu bewertenden Systemen werden - gruppiert nach dem prinzipiellen Vorgehen - in Kapitel 2.4 verschiedene Bewertungsverfahren vorgestellt. Schließlich erfolgt eine Ableitung von Anforderungen aus dem Stand der Technik an ein Bewertungsverfahren für integrale Sicherheitssysteme.

### 2.1 Historie der Fahrzeugsicherheit

Unter einem Automobil wird gemeinhin ein Wagen verstanden, "der sich von selbst bewegt, weder von Mensch noch Tier noch Wind getrieben" [Ven11].



**Abbildung 2.1:** Dampfgetriebenes Fahrzeug des französischen Erfinders Nicholas Joseph Cugnot aus dem Jahr 1769 [Ven11]

Demnach beginnt die Geschichte des heutigen Automobils bereits 1769, als der Franzose Nicholas Joseph Cugnot für das Kriegsministerium ein dampfgetriebenes Fahrzeug zum Transport von Geschützen entwickelt. Das dreirädrige Gefährt (siehe Abbildung 2.1) kann vier Personen mit bis zu 4 km/h Geschwindigkeit befördern - allerdings ist der Dampfkessel bereits nach 12 Minuten leer. Auf Grund des hohen Gewichts auf dem Vorderrad ist das Fahrzeug nur schwer lenkbar,

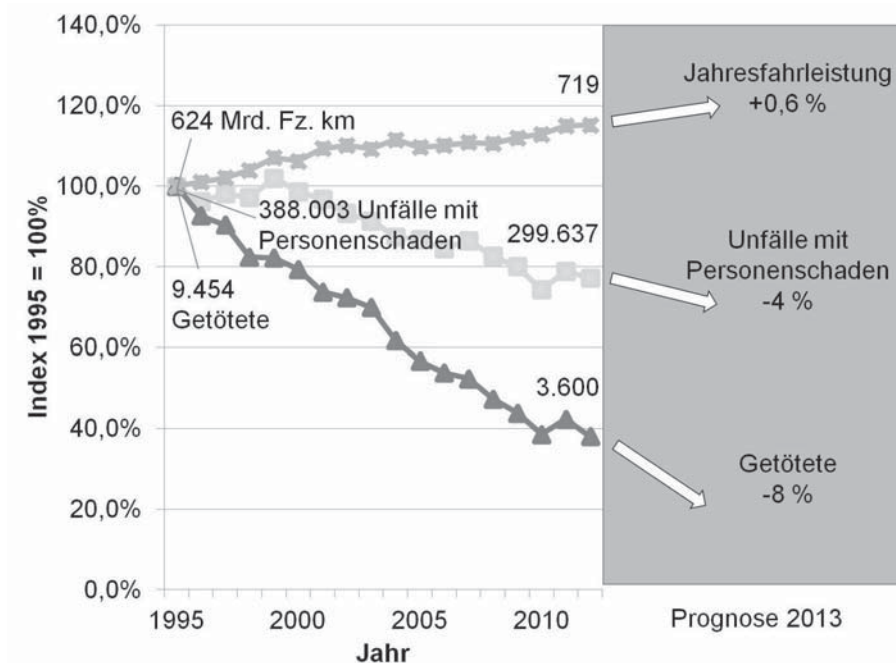
weshalb der Erfinder gegen die Kasernenmauer gefahren sein soll. Somit würde Cugnot zumindest die Ehre des ersten Autounfalls zustehen.

Bereits im Jahr 1881 stellt Gustave Trouvé das erste funktionsfähige und alltags-taugliche Elektroauto in Paris vor. Aber die sinkenden Bezin-kosten unterstützen den Siegeszug des Verbrennungsmotors.

Das erste Patent für einen funktionsfähigen Gasmotor stammt aus dem Jahr 1860 von Étienne Lenoir, der als Grundstein für viele Weiterentwicklungen verwendet wird - unter Anderem von Nicolaus August Otto, dem Namensgeber aller heuti-gen Benzinmotoren mit Fremdzündung und Hubkolbenantrieb, der Ottomotoren [Ven11].

Erst 1886 lässt sich Benz sein motorgetriebenes Dreirad patentieren, was ge-meinhin als Geburtsstunde des modernen Automobils gilt.

1936 sind bereits knapp 1,4 Millionen Fahrzeuge in Deutschland zugelassen. Da sich die motorisierten Fahrzeuge im selben Verkehrsraum wie Fußgänger, Rad-fahrer, Pferde und Fuhrwerke bewegen, steigt jedoch die Unfallwahrscheinlichkeit stark an. Auch die vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten der motorbetrie-behen Verkehrsmittel erhöhen die Unfallwahrscheinlichkeit und zudem die Gefahr schwerer Schäden. So wurden bereits 1936 102.509 Personen im Straßenver-kehr verletzt und 5.069 Personen getötet [Unt93]. Im Jahr 2012 stehen dem ge-genüber 53,8 Millionen zugelassene Fahrzeuge und 3.600 Getötete laut Aussa-



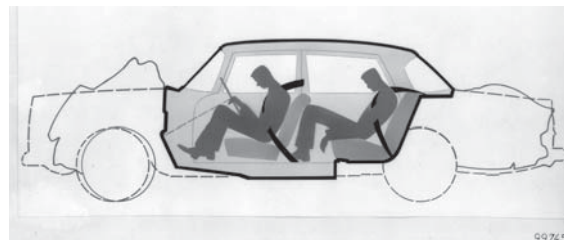
**Abbildung 2.2:** Entwicklung der Fahrleistung, der Unfälle mit Personenschaden und der Getöteten in den Jahren 1995 bis 2013 [Ler13]

## 2.1 HISTORIE DER FAHRZEUGSICHERHEIT

---

ge des Statistischen Bundesamts [Ler13]. Abbildung 2.2 zeigt die Entwicklung der Fahrleistung, der Unfälle mit Personenschaden und der Getöteten zwischen 1995 und 2012. Während die Fahrleistung innerhalb von 7 Jahren um 15 % gestiegen ist, hat sich die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden um 23 % reduziert. Besonders bemerkenswert ist die Reduktion der Anzahl der Getöteten um 62 %.

Diese Entwicklung ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass seit Beginn des Automobilbaus auch an der Verbesserung der Sicherheit gearbeitet wird. So preist bereits 1921 Mercedes-Benz seine Fahrzeuge mit stabiler Karosserie an, die sogar heftigsten Überschlägen stand hält. Der damalige Irrglaube besagt „Je heiler das Auto nach dem Crash, desto gesünder der Mensch im Fond“ [Spi10].



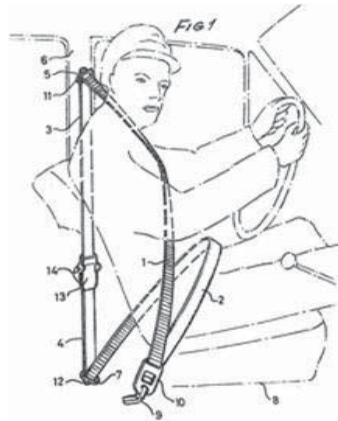
**Abbildung 2.3:** Sicherheitsfahrergastzelle entworfen von Mercedes Ingenieur Barényi [Ode10]

Erst 1952 lässt sich der Mercedes-Benz Entwickler Béla Barényi die von ihm entwickelte Knautschzone unter der Patent Nr. 854 157 patentieren (siehe Abbildung 2.3). Grundgedanke des Patents ist, dass die Aufprallenergie beim Unfall durch Verformung abgebaut werden muss mit dem Ziel, für den Menschen erträgliche Kräfte und Beschleunigungen im Rückhaltesystem zu erzeugen. Die Idee dabei ist eine Dreiteilung der Karosserie: in der Mitte befindet sich die formstabile Insassenzelle, umgeben von verformbaren Knautschzonen an Front und Heck. 1959 entsteht mit dem Mercedes-Benz W 111 das erste Serienfahrzeug, das nach diesem Prinzip konstruiert wird.

Der Sicherheitsgurt, der vom Deutschen Patentamt zu einer der acht wichtigsten Erfindungen der letzten 100 Jahre ernannt wurde, rettet in abgeänderter Form bereits 1902 dem Rennfahrer Walter C. Baker aus Cleveland, Ohio, das Leben. Er überschlägt sich bei dem Versuch, mit seinem Elektrowagen einen neuen Weltrekord aufzustellen mit 125 km/h [May99]. Weil er sich mit einem Lederriemen im offenen Fahrzeug festschnallt, überlebt er den Unfall. In den USA wird der Nash Ambassador bereits 1949 serienmäßig mit Beckengurten ausgestattet. Diese Gurte können zwar ein Herausschleudern aus dem Fahrzeug verhindern, allerdings bewahren sie den Insassen nicht vor dem sogenannten „Klappmes-

---

sereffekt“, also dem Aufschlagen von Kopf und Brust auf das Lenkrad oder die Instrumententafel. In Deutschland übernimmt bei der Gurtfrage anfangs Porsche die Vorreiterrolle. Der 365 A ist bis Modelljahr 1956 auf Wunsch mit Beckengurten erhältlich, ab 1957 auch mit Diagonalgurten.



**Abbildung 2.4:** Skizze des Dreipunktsicherheitsgurts von Nils Bohlin [Boh66]

Der hartnäckigste Verfechter der Gurtphilosophie in der damaligen Zeit ist allerdings Volvo. Der Entwickler Nils Bohlin läßt sich 1959 den selbst entwickelten Dreipunktgurt patentieren (siehe Abbildung 2.4). Maßgeblich verantwortlich für den Bekanntheitsgrad des Sicherheitsgurtes ist eine Studie von Volvo, in der 28.000 Unfälle mit Beteiligung eines Volvo analysiert werden. Das Ergebnis der Studie zeigt eine durchschnittliche Verringerung des Verletzungsrisikos von 50-60% von gegurteten Insassen gegenüber ungegurteten. In Deutschland wird ab 1974 der Einbau von Gurten in Neuwagen vorgeschrieben. Die Gurtragepflicht wird allerdings erst ab 1984 mit einem Bußgeld versehen. Die Unfallstatistik des Statistischen Bundesamtes zeigt, dass innerhalb eines Jahres fast 1.800 Menschen weniger bei Verkehrsunfällen ums Leben kommen. Dies entspricht einer Reduktion der Getöteten um 17,6%. In seiner weiteren Entwicklung wird der Gurt mit zusätzlichen Komponenten wie dem Gurtstraffer und dem Gurtkraftbegrenzer ausgestattet (siehe Kapitel 2.3.2.1).

Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung der passiven Fahrzeugsicherheit ist der Airbag (siehe Kapitel 2.3.2.2). Bereits 1920 taucht der Luftsack als Patent für Sicherheitseinrichtungen in Flugzeugen auf. Er besteht zu Beginn aus einem luftgefüllten Gummibeutel. Für Fahrzeuge entwickelt 1951 Walter Linderer ein Patent. Auf Basis dieser Arbeit werden in den USA zunächst mit Pressluft auffüllbare Luftsäcke entwickelt. 1974 stellt GM einen Druckluft-Airbag in Serie her, der allerdings nach mehreren schweren Unfällen mit tödlichen Verletzungen wieder vom Markt genommen wird [Foc10].



**Abbildung 2.5:** Skizze der Aufprallschutzvorrichtung für den Insassen eines Kraftfahrzeugs von Mercedes-Benz [Mer91]

Mercedes-Benz beginnt 1967 mit der Entwicklung eines praxistauglichen Airbags und erhält 1971 das Patent darauf [Mer91]. Abbildung 2.5 zeigt die Funktionsskizze dieses Patents. Den Durchbruch schafft der Airbag ab 1980 in der Mercedes S-Klasse. Seither werden Airbags für verschiedenste Einsatzorte, ob Kopf-, Knie- oder Seitenairbag, entwickelt. Neueste Forschungen beschäftigen sich mit der Entwicklung von Außenairbags zum Schutz von verletzlichen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern oder Radfahrern.

Neben der Weiterentwicklung passiver Sicherheitssysteme zeigt sich ein weiterer deutlicher Trend in der vermehrten Entwicklung und Verbreitung von sogenannten aktiven Sicherheitssystemen. Da diese Systeme bereits vor der eigentlichen Kollision den Fahrer unterstützen, kann nicht nur die Unfallschwere reduziert werden, sondern es besteht die Möglichkeit Kollisionen gänzlich zu vermeiden. Vor allem aber lässt die intelligente Vernetzung aktiver und passiver Systemkomponenten zu integralen Sicherheitssystemen einen großen Einfluss auf die Verkehrssicherheit erwarten.

## 2.2 Klassifizierung von Sicherheitssystemen

Im Folgenden werden die Begriffe aktive, passive und integrale Sicherheit erläutert. Dazu werden zunächst die einzelnen Phasen eines Unfallentstehungsprozesses definiert.