1 Einleitung

1.1 Motivation

Die *Fahrzeugentwicklung* hat sich seit der flächendeckenden Einführung motorgetriebener Fortbewegungsmittel gemeinsam mit dem steigenden Kundenbedürfnis nach Komfort, Sicherheit und Effizienz im Laufe der letzten Jahrzehnte signifikant gewandelt. Während anfangs bereits die Möglichkeit zur individuellen Mobilität für Automobilkunden ein Begeisterungsmerkmal darstellte, differenzieren sich Fahrzeughersteller heute durch immer innovativere Funktionalitäten zur Optimierung von Komfort, Sicherheit und Effizienz beim Fahren.

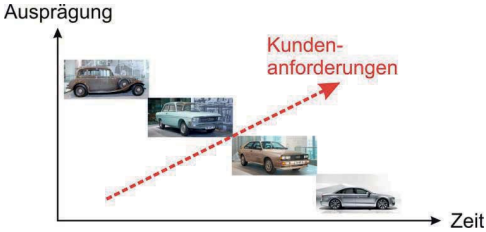

Abbildung 1-1: Fahrzeuge und Kundenbedürfnisse im Wandel der Zeit (Fahrzeugdarstellungen: [7])

Die steigenden Kundenbedürfnisse waren eine Begleiterscheinung der zunehmenden Nutzungshäufigkeit von Kraftfahrzeugen als Fortbewegungsmittel. Seit den 1960er Jahren hat sich die Anzahl auf Deutschlands Straßen verkehrender Fahrzeuge sowie deren Kilometerleistung signifikant erhöht (siehe Abbildung 1-2).

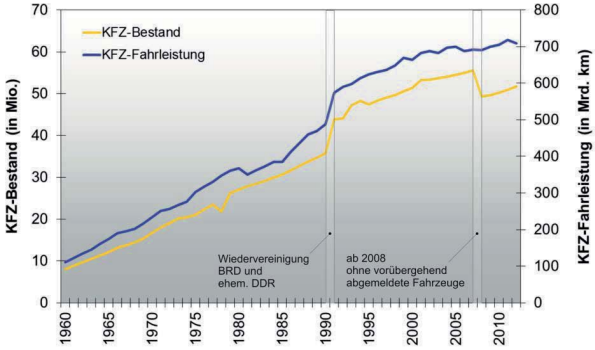

Abbildung 1-2: Entwicklung von Fahrzeugbestand und Fahrleistung in Deutschland (nach [1], [2], [14], [73], [114])

Angesichts des stark wachsenden Verkehrsaufkommens wurden gerade im Bereich der *Fahrzeugsicherheit* kontinuierlich neuartige Systeme entwickelt, welche durch

„passive“ Maßnahmen die Folgen auftretender Unfälle mildern oder „aktiv“ Unfälle vermeiden. Diese haben in Kombination mit ergänzenden rechtlichen und infrastrukturellen Verbesserungen wesentlich dazu beigetragen, dass heute die Anzahl der Verletzten und Getöteten im Straßenverkehr bei Vervielfachung der Fahrleistung den Stand aus dem Jahr 1960 deutlich unterschreitet (siehe Abbildung 1-3).

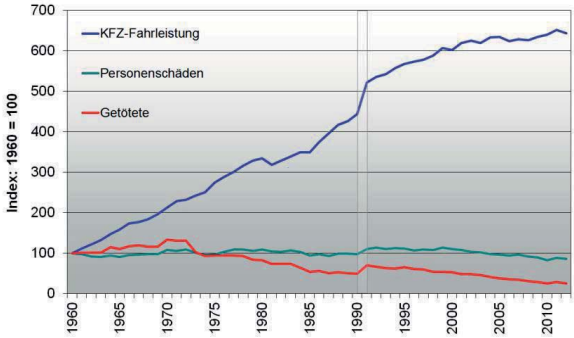

Abbildung 1-3: Entwicklung von KFZ-Fahrleistung, Personenschäden und Getöteten auf Deutschlands Straßen (nach [1], [2], [14], [114], [134])

Der historische *Entwicklungs- und Optimierungsprozess passiver und aktiver Fahrzeugsicherheitssysteme* sowie *fahrzeugsicherheitsrelevanter Rahmenbedingungen* ist in Abbildung 1-4 dargestellt.

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts wurden erste Bemühungen zur aktiven Unfallvermeidung durch die Einführung von profilierten Gummireifen und mechanisch angetriebenen Scheibenwischern in Ursprungsgenerationen motorbetriebener Fahrzeuge unternommen. Tiefergehende Überlegungen zum optimierten passiven Schutz der Fahrzeuginsassen während eines Unfalls begannen mit den Patentschriften zu Kraftfahrzeug-Airbags im Jahre 1951 und zum Knautschzonenkonzept ein Jahr später. Der damit begründete Ansatz, die Fahrgastzelle zur Sicherung des Überlebensraums für die Insassen möglichst steif zu gestalten, die Kollisionswirkung durch eine deformierbare Knautschzone ausreichend sanft abzubauen und die Insassenbewegung durch Rückhaltekomponenten unter möglichst geringer Belastung abzubremsen, stellt bis heute die übergeordnete Maßgabe bei der Auslegung von Insassenschutzsystemen dar. Durch das Patent des Dreipunktgurts im Jahre 1959 konnte die Wirkung der bisher üblichen Beckengurtsysteme wesentlich verbessert werden. Mit Einführung der Gurtpflicht im Jahre 1976 war auch eine flächendeckende Verbreitung der Komponenten sichergestellt. [8], [82], [108], [125]

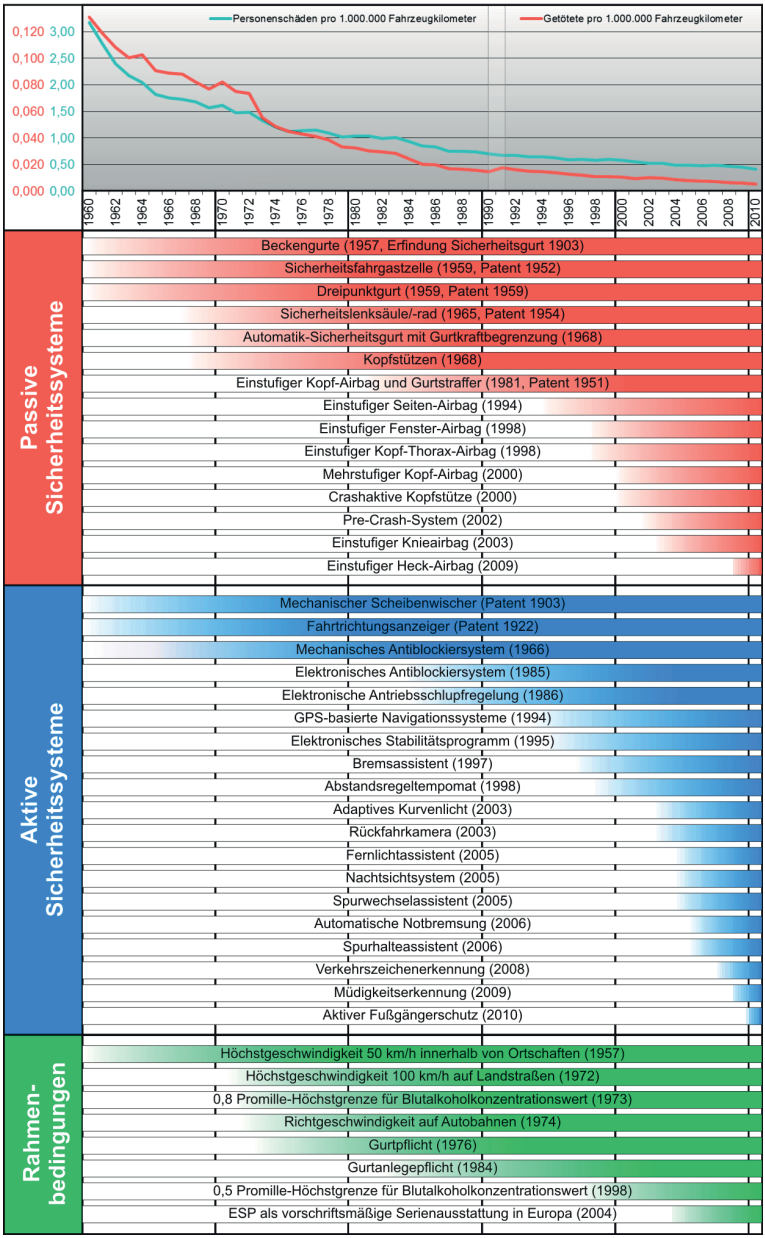

Abbildung 1-4: Geschichte der Fahrzeugsicherheit im Überblick (nach [8], [21], [67], [82], [105], [108], [125], [131])

Gemeinsam mit rechtlichen Maßnahmen wie der Einführung einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h innerhalb von Ortschaften im Jahr 1957, einer Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h auf Landstraßen im Jahr 1972 sowie der 0,8 Promille-Höchstgrenze für den Blutalkohol-Konzentrationswert im Jahr 1973 wurde ab 1972 die vorher zunehmende Anzahl der Verkehrstoten auf Deutschlands Straßen kontinuierlich gesenkt. Dieser Trend konnte durch die Einführung der Gurtanlegepflicht im Jahr 1984 weitergehend unterstützt werden. Zu Beginn der 1980er Jahre waren die ersten Lenkrad-Airbags in Deutschland serienmäßig verfügbar. Im Zuge der wachsenden Möglichkeiten durch leistungsfähige und preisgünstige Elektronikkomponenten erschien im Jahr 1985 das erste Serienfahrzeug mit dem Antiblockiersystem ABS, welches zehn Jahre später durch das Elektronische Stabilitätsprogramm ESP ergänzt wurde. Beide Systeme haben die aktive Fahrzeugsicherheit bis heute bedeutend verbessert. Erst nach der gesetzlichen Forderung erweiterter passiver Sicherheitssysteme in den USA im Jahr 1988 fanden die Airbagsysteme größere Verbreitung. In den Anfangsjahren gab es jedoch häufiger Probleme mit Fehlauslösungen insbesondere in kritischen Out-of-Position-Situationen, in denen sich Insassen in kleinem Abstand vor dem Airbagmodul und somit direkt im Entfaltungsbereich des Airbags befinden. Deswegen wurde im Jahr 2000 der in den USA gültige Standard FMVSS 208 zum Schutz von Insassen bei Frontalkollisionen um einen Test zur Bewertung der Airbagwirkung auf in den Entfaltungsbereich ragende Körperteile ergänzt. Dies begünstigte die Einführung mehrstufiger Kopfairbags und reduzierte die Aggressivität der Airbagzündung. Gemeinsam mit der Optimierung der Ansteuerungszuverlässigkeit wurden kontinuierlich zusätzliche Airbags in die Fahrzeuge integriert, welche die Insassen in allen Kollisionsarten und -richtungen weich an das Fahrzeug ankoppeln (Knieairbag, Seitenairbag, Kopf-Thorax-Airbag, …). Zur verbesserten Adaptierbarkeit der Rückhaltewirkung auf unterschiedliche Crashschwerestufen wurden Anfang des 21. Jahrhunderts mehrstufige Airbagsysteme eingeführt, deren Wirkung durch erste umfeldsensorbasierte Pre-Crash-Funktionen zur optimalen Vorkonditionierung von Insassen und Fahrzeug auf die bevorstehende Kollision unterstützt wurden und die passive Fahrzeugsicherheit auf das gegenwärtig hohe Niveau brachten. Mit dem Jahrtausendwechsel begann überdies die flächendeckende Einführung von neuartigen vorausschauend aktiven Sicherheitsfunktionen wie Abstandsregeltempomaten, Brems-, Spurhalte-, Spurwechselassistenten oder automatischen Notbremssystemen. Diese werden bis heute optimiert sowie durch weitere unterstützende oder autonom agierende Komponenten zur Unfallvermeidung ergänzt. [8], [16], [67], [82], [108], [125]

Was die verwendeten *Systembausteine* betrifft, hat sich die *Entwicklung von Fahrzeugsicherheitsfunktionen* seit Anfang der 1990er Jahre signifikant gewandelt. Dies ist insbesondere auf die wachsenden Möglichkeiten durch neuartige mechatronische Sensoren und Aktoren sowie schnelle echtzeitfähige Datenverarbeitungskomponenten zurückzuführen. Nach [147] hat sich der Anteil an Elektrik- und Elektronikkomponenten im Fahrzeug von 12 Prozent im Jahre 1995 auf 28,8 Prozent im Jahr 2010 erhöht und somit mehr als verdoppelt (siehe Abbildung 1-5).

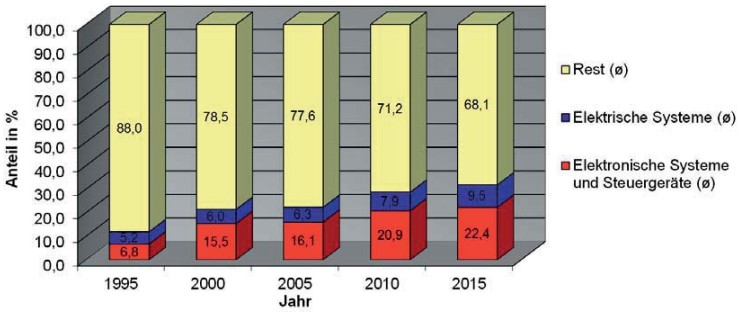

Abbildung 1-5: Entwicklung des durchschnittlichen Anteils von Elektrik- und Elektronikkomponenten pro Fahrzeug (nach [147])

Der prognostizierte Zuwachs an mechatronischen Komponenten und Systemen bietet zukünftig weitere Möglichkeiten zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit. Da die über Jahrzehnte hinweg optimierte passive Fahrzeugsicherheit mittlerweile im Stadium der Sättigung auf hohem Niveau angelangt ist (siehe [85]), besteht das größte Verbesserungspotential in der Realisierung von integralen Systemen. Diese verzahnen automatisiert passive und aktive Komponenten, um die Insassenschutz-Wirkkette bestmöglich zu gestalten (siehe Abbildung 1-6).

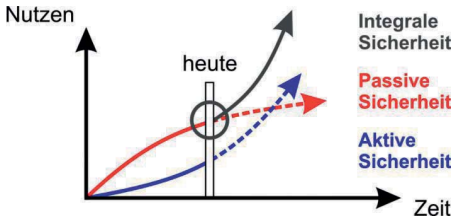

Abbildung 1-6: Nutzensteigerung durch Integrale Sicherheit (nach [127])

Es wird also in Zukunft eine zunehmende Integration aktiver und passiver Sicherheitskomponenten geben (vgl. [15], [53], [54]), welche durch eine ganzheitliche Betrachtung des Kollisionsgeschehens über die Pre-, In- und Post-Crash-Phase die in Schweden geborene Vision Zero (siehe [139]) von einem Verkehrsgeschehen ohne Getötete und Schwerverletzte näher rücken lassen. Die dazu notwendigen geschlossenen Wirkketten erfordern insbesondere eine durchgehende sensorielle Abdeckung des Kollisionsgeschehens, so dass aktive Systeme möglichst frühzeitig unfallvermeidend eingreifen und passive Systeme die Folgen auftretender Kollisionen unter Nutzung aller vorliegenden Informationen optimal reduzieren können.

Unabhängig von zukünftigen Verbesserungen im Bereich der aktiven Unfallvermeidung wird nach wie vor ein signifikanter Anteil der Effektivität integraler Sicherheitssysteme von passiven Komponenten ausgehen, welche erst nach Kollisionseintritt ihre Wirkung entfalten. Dies liegt in erster Linie an den nachfolgend aufgeführten

limitierenden Faktoren für aktive Sicherheitssysteme, welche die Wunschvorstellung einer vollständigen Vermeidung von Unfällen in der Realität begrenzen:

- **Umfelderfassung**: Unfallvermeidende Maßnahmen (Brems-/Lenkmanöver) können nur dann rechtzeitig eingeleitet werden, wenn das gegnerische Objekt rechtzeitig und korrekt (also vor der physikalischen Unvermeidbarkeit der Kollision) durch umfelderfassende Sensorik erkannt wird. Dies ist aufgrund von äußeren Einschränkungen des Erfassungsbereichs (z. B. parkende Fahrzeuge, Gebäude, …) und Detektionsunschärfen (ungenaue Messung, notwendige Mindestanzahl von Zyklen für Objektbildung, Tiefpasscharakter des Objekttrackings, Verarbeitungs-/Signallaufzeiten, …) vorhandener Messprinzipien nicht immer möglich.

- **Verbreitung**: Auch bei Ausstattung des eigenen Fahrzeugs mit einem ideal arbeitenden Unfallvermeidungssystem existieren andere Verkehrsteilnehmer (Fahrzeuge, Motorradfahrer, Radfahrer, Fußgänger, Tiere, …) ohne aktive Sicherheitssysteme, die sich nicht unfallvermeidend verhalten und somit selbst bei bis in den Stillstand abgebremstem oder stationär stehendem Eigenfahrzeug aktiv Kollisionen verursachen können.

- **Mensch**: Überschreitet der Fahrer aktiv die fahrphysikalischen Grenzen des eigenen Fahrzeugs aufgrund von riskanter Fahrweise oder plötzlicher Verschlechterung der Fahrbahnbedingungen, kommt es zu Situationen, in denen die Manövrierfähigkeit (Brems-/Lenkbarkeit) des Fahrzeugs und somit auch die Wirksamkeit von vielen aktiven Sicherheitssystemen verloren geht.

- **Systemzuverlässigkeit**: Intelligente unfallvermeidende Systeme im Fahrzeug sind nur dann wirksam, wenn das mechatronische Gesamtsystem die auf Basis von Umfeldsensorinformationen algorithmisch abgeleiteten Steuervorgaben auch umsetzen kann. Dies kann an einem über die gesamte Fahrzeugeinsatzdauer nicht vollständig auszuschließenden Versagen des mechanischen, elektronischen oder informationstechnischen Gesamtsystems scheitern. So können Reifenplatzer, Achsbrüche, Kurzschlüsse oder Wackelkontakte in der Verkabelung sowie Programmierfehler zu Ausfällen von unfallvermeidenden Systemen führen.

Insgesamt werden die Bemühungen zur Gewährleistung einer zuverlässigen aktiven Sicherheit im Fahrzeug zu einer weiteren Reduktion der Unfallzahlen und der Zahl der Getöteten und Verletzten im Straßenverkehr führen. Das Erreichen des Idealzustands ohne jegliche verunfallten Fahrzeuge im Straßenverkehr ist jedoch durch die gerade genannten Faktoren limitiert. Somit ist die Entwicklung und Analyse von Verbesserungspotentialen im Bereich passiver Sicherheitssysteme nach wie vor ein Themenbereich von hoher Bedeutung. In Anbetracht der zunehmenden Verbreitung leistungsfähiger Umfeldsensoren in Fahrzeugen stellt sich insbesondere die Frage nach den Potentialen der integralen Nutzung von Pre- und In-Crash-Sensoren zur optimierten Ansteuerung von Rückhaltesystemen.

1.2 Zielsetzung und Struktur

Eine vollständige Vermeidung von Unfällen im Straßenverkehr wird trotz der stetig wachsenden Anzahl unfallvermeidender Systeme mittelfristig aufgrund der limitierenden Faktoren Umfelderfassung, Mensch, Verbreitung und Systemzuverlässigkeit (siehe Kapitel 1.1) nicht realisierbar sein. Somit stellt die Optimierung der passiven Sicherheit nach wie vor einen wesentlichen Gegenstand zukünftiger Fahrzeugentwicklungen dar. Angesichts neuartiger Möglichkeiten durch die zunehmende Verbreitung und Leistungsfähigkeit vorausschauender Sensorsysteme sollen in dieser Arbeit die Möglichkeiten und Grenzen der integralen Nutzung von Pre-Crash-Sensorik in Algorithmen zur Ansteuerung von Rückhaltesystemen im Frontalcrash als statistisch häufigster Unfallart aufgezeigt und untersucht werden (siehe Abbildung 1-7).

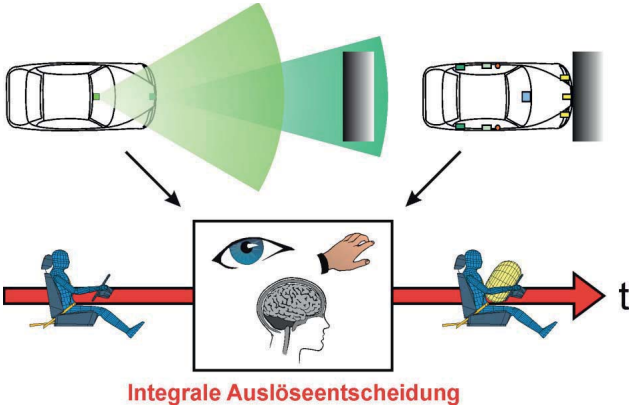

Abbildung 1-7: Nutzung vorausschauender Sensorik zur integralen Ansteuerung frontaler Rückhaltesysteme

Hierzu werden auf Basis einer Darstellung der Grundlagen und des Stands der Technik passiver Fahrzeugsicherheitssysteme sowie der Rahmenbedingungen des gegenwärtigen Kollisionsgeschehens zunächst die Grenzen rein beschleunigungsbasierter Crashsensierungskonzepte aufgezeigt (siehe Kapitel 2). In Folge wird ein Gesamtkonzept zur integralen Kollisionserkennung entwickelt, welches die Ansteuerungsentscheidung der Rückhaltesysteme während der Kollision unter gleichzeitiger Nutzung von Umfeld- und Crashsensorinformationen ableitet (siehe Kapitel 3). Die hierfür notwendige durchgängige Signalverarbeitungskette von der fahrphysikalischen Unvermeidbarkeit der Kollision bis zur Aktivierung von Rückhaltesystemen nach Kollisionseintritt wird anschließend hinsichtlich der Grenzen der Kollisionsparameter-/Crashschwerebestimmung sowie der Auslöseentscheidungsfindung unter gegebenen sensoriellen Unschärfeeffekten analysiert (siehe Kapitel 4). Die Arbeit betrachtet hierbei die Aufgabe der integralen Crashklassifikation aus Sicht der verfügbaren Eingangsgrößen und grenzt das unter sensorbedingt gegebenen Ungenauigkeiten mögliche Potential zur Crashschweredifferenzierung ein. Ergänzend

wird ein entwicklungsbegleitendes Testkonzept dargestellt, welches szenariobasiert die kollisionsphasenübergreifende Absicherung und Freigabe der Auslösealgorithmik im Crashhallen- und Feldgeschehen auf Basis realer und simulierter Eingangsdaten ermöglicht und auf dessen Grundlage die entwickelten Ansteuerungskonzepte bewertet werden (Kapitel 5). Abschließend wird die Arbeit zusammenfassend dargestellt und ein Ausblick auf zukünftig mögliche Entwicklungen gegeben (Kapitel 6).

2 Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit

In diesem einleitenden Abschnitt wird ein Überblick über die Grundlagen und den Stand der Technik passiver Insassenschutzsysteme gegeben. Ausgehend von einer Einführung in die Terminologie (Kapitel 2.1) werden die Systemkomponenten gegliedert nach Sensorik, Aktorik und Algorithmik (Kapitel 2.2) sowie die durch das Kollisionsgeschehen gesteckten Rahmenbedingungen (Kapitel 2.3) dargestellt. Abschließend werden die systembedingten Grenzen konventioneller beschleunigungsbasierter Crashapplikationen im Fahrzeug aufgezeigt (Kapitel 2.4).

2.1 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

2.1.1 Passives Insassenschutzsystem

Das Ziel eines *passiv wirkenden Insassenschutzsystems* im Fahrzeug besteht darin, die negativen Auswirkungen einer Kollision für die Insassen möglichst gering zu halten. Eine exemplarische Umsetzung nach dem Stand der Technik mit konventioneller Crashsensorik und marktüblichen Rückhaltesystemen als Crashaktorik ist in Abbildung 2-1 schematisch dargestellt.

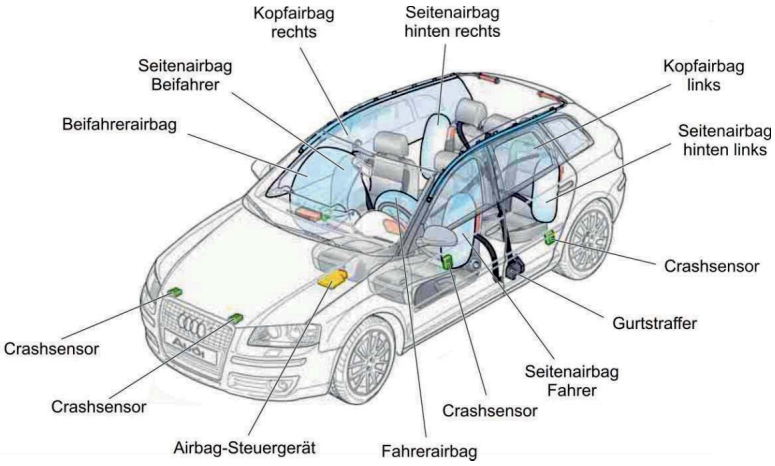

Abbildung 2-1: Passiv wirkendes Insassenschutzsystem (nach [6])

Sowohl der sich bei Kollisionen durch Karosserieverformung reduzierende *Überlebensraum* als auch die während der Kollision auftretende *Beschleunigungsbelastung* stellen die wesentlichen Gefahrenpotentiale dar, denen das Insassenschutzsystem bestmöglich begegnen muss.

Der Überlebensraum wird in heutigen Fahrzeugen entsprechend des Knautschzonenkonzepts nach [12] durch eine sehr steife Fahrgastzelle zur Vermeidung von Intrusionen und eine verformbare Knautschzone zum definierten Abbau der Crash-

energie gesichert. Eine entsprechend gestaltete PKW-Vorbaustruktur mit Deformationszonen ansteigender Kraftniveaus $F(u)$ ist in Abbildung 2-2 über der Verformung u dargestellt.

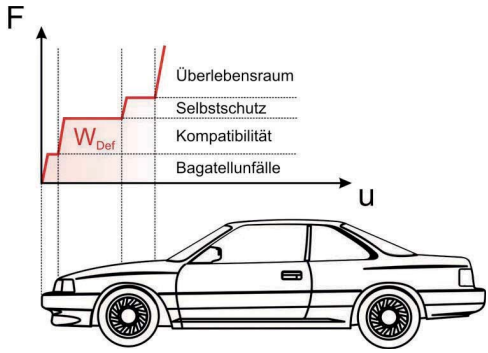

Abbildung 2-2: Deformationszonen an der PKW-Vorbaustruktur (nach [11], [74], [82])

Zur Reduktion der während einer Kollision resultierenden Beschleunigungsbelastung auf Fahrzeuginsassen kommen *Crashapplikationen* zum Einsatz. Unter einer Crashapplikation wird nachfolgend ein System verstanden, welches auf Basis von Crash- und Innenraumsensorinformationen (Kapitel 2.2.1) algorithmisch die Ansteuerung von Rückhaltemitteln (Kapitel 2.2.2) durchführt (siehe Abbildung 2-3).

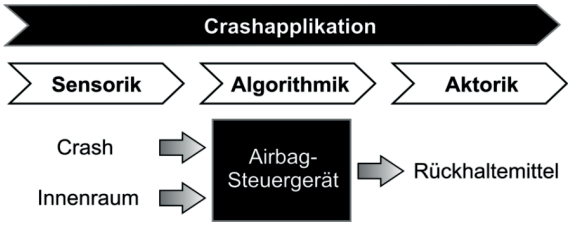

Abbildung 2-3: Struktur von Crashapplikationen

Im Fahrzeug werten auf dem *Airbag-Steuergerät* als zentraler Hardwarekomponente implementierte *Auslösealgorithmen* (Kapitel 2.2.3) die crashbezogenen Sensormesssignale zyklisch nach unterschiedlichen Gesichtspunkten aus, differenzieren kurz nach Eintritt einer Kollision den aktuell vorliegenden Lastfall und führen unter Berücksichtigung der über Fahrzeuginnenraumsensoren detektierten Parameter (Insassenposition, -größe, -gewicht, …) eine Ansteuerung der während des identifizierten Crashs notwendigen Rückhaltemittel herbei. Durch die Wirkung von Crashapplikationen soll der Insasse bei sprunghaft auftretenden Fahrzeugverzögerungen unter kleinstmöglicher verträglicher Belastung der beanspruchten Körperpartien (Kriterien siehe z. B. in [5]) an die Fahrgastzellenbewegung angekoppelt werden. Die Ab-

bremsung des Insassen (Geschwindigkeit v_{Ins}) durch die angesteuerten Rückhaltemittel muss dabei zur Belastungsminimierung so erfolgen, dass er möglichst frühzeitig nach Kollisionseintritt an die Fahrzeugbewegung angekoppelt und unter Ausnutzung des gesamten verfügbaren Vorverlagerungswegs gleichmäßig an die Fahrzeuggeschwindigkeit v_{Fzg} angepasst wird (siehe Abbildung 2-4).

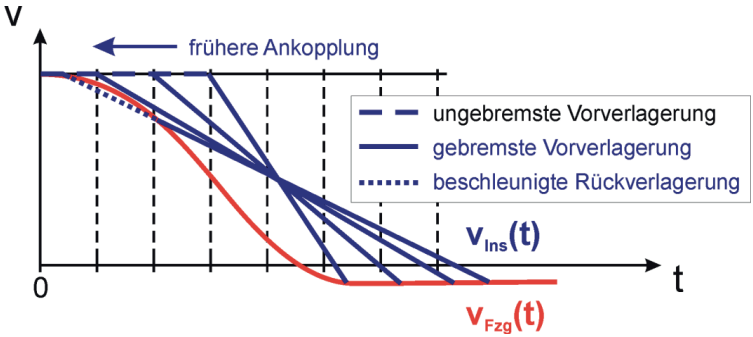

Abbildung 2-4: Insassenankopplung an das längsverzögerte Fahrzeug (in Anlehnung an [40], [56], [82])

Dies hat für die Entwicklung von Crashalgorithmen zur Folge, dass die Notwendigkeit einer Rückhaltesystemansteuerung und die zu erwartende Crashschwere so früh wie möglich erkannt werden müssen. Die schnellstmöglich anzusteuernden Rückhaltesystemstufen sollen im Idealfall über der Crashdauer weder eine zu geringe noch eine zu hohe Rückhaltewirkung entfalten, da es sonst zu Insassenkontakt mit harten Innenraumstrukturelementen kommt oder der Vorverlagerungsweg nicht komplett ausgenutzt wird. Das Kernproblem bei der Auslegung von Crashapplikationen liegt also in der frühzeitigen algorithmischen Abschätzung der zu erwartenden Crashschwere (siehe Kapitel 2.1.2), was in konventionellen Serienapplikationen auf Basis der Messinformationen der in Kapitel 2.2.1.1 dargestellten Crashsensoren erfolgt.

2.1.2 Crashschwere

Unter *Unfall- oder Crashschwere* wird in dieser Arbeit die mechanische Auswirkung einer Kollision auf die Fahrgastzelle in Form eines Beschleunigungspulses verstanden, welcher vom Rückhaltesystem durch adaptive Reaktion kompensiert werden muss. Sie ist in den nachfolgend schwerpunktmäßig betrachteten Frontalkollisionen des Eigenfahrzeugs durch den zeitlichen Verlauf des Crashpulses $a(t)$ in Fahrzeuglängsrichtung, also der an zentraler Stelle in der Fahrgastzelle sensierten Längsbeschleunigungssignale, über die Dauer der mechanischen Wechselwirkung charakterisiert. Letztere werden infolge der gegenüber dem Insassengewicht deutlich größeren Fahrzeugmasse als näherungsweise unabhängig von der Fahrzeug-/Insassenwechselwirkung betrachtet. Aus dem zeitlichen Beschleunigungsverlauf $a(t)$ über die Kollisionsdauer Δt_{Koll} lassen sich integrale Crashschwerekennwerte ableiten,

welche die korrespondierende Kollisionswirkung auf abstrakter Ebene beschreiben. In der Literatur (z. B. [26], [32], [82], [83], [84], [104], [112]) und Anwendungspraxis werden üblicherweise die in Abbildung 2-5 dargestellten Crashschwerekennwerte verwendet, welche nachfolgend näher erläutert werden.

Formelzeichen	Beschreibung
Δv	Stoßbedingte Längsgeschwindigkeitsänderung der Fahrgastzelle ($\Delta v < 0$)
a_m	Mittlere Längsbeschleunigung der Fahrgastzelle während des Stoßes ($a_m < 0$)
a_{max}	Maximaler Längsverzögerungsbetrag der Fahrgastzelle während des Stoßes ($a_{max} > 0$)
OLC	Occupant Load Criterion ($OLC > 0$)

Abbildung 2-5: Integrale Unfallschwerekennwerte

Die genannten Kennzahlen zur abstrakten Charakterisierung des longitudinalen Crashpulses sind in Abbildung 2-6 für einen typischen exemplarisch vorgegebenen Beschleunigungsverlauf ausgehend vom Kollisionseintrittszeitpunkt $t_{Koll} = 0$ visualisiert.

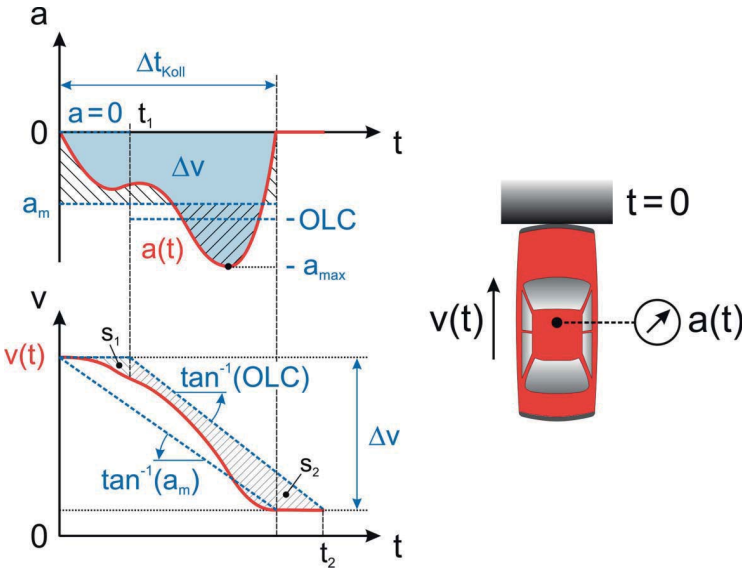

Abbildung 2-6: Ableitung integraler Crashschwerekennwerte aus dem Crashpuls $a(t)$ in Längsrichtung an der Fahrgastzelle

Die *stoßbedingte Geschwindigkeitsänderung* Δv als Crashschweremaß wird häufig in der Unfallforschung als Grundlage für die statistische Betrachtung des realen Unfallgeschehens auf Basis von Unfallrekonstruktionen herangezogen (z. B. [117], [135]). Sie berechnet sich im eindimensionalen Längskollisionsfall aus dem gegebenen Beschleunigungsverlauf $a(t)$ ausgehend vom Kontaktzeitpunkt t_{Koll} bei der Kollisionsdauer Δt_{Koll} folgendermaßen:

$$\Delta v = \int_{t_{Koll}}^{t_{Koll}+\Delta t_{Koll}} a(t) \cdot dt \tag{2.1}$$

Die *mittlere Längsbeschleunigung* a_m über der Stoßdauer stellt den Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeitsabbau Δv und der Wechselwirkungszeit Δt_{Koll} her. Der gleiche Geschwindigkeitsabbau kann aus einer hohen mittleren Beschleunigung in Kombination mit einer kurzen Wechselwirkungszeit oder einer geringen mittleren Beschleunigung in Kombination mit einer langen Wechselwirkungszeit resultieren.

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t_{Koll}} \tag{2.2}$$

Die *maximale Beschleunigung* a_{max} über der Stoßdauer Δt_{Koll} liefert eine Aussage über die momentane Maximalverzögerungswirkung des Stoßvorgangs. Unter der Prämisse, dass sich die Knautschzonenkraftniveaus der Kollisionsgegner über der Verformung progressiv verhalten (siehe Knautschzonenkonzept Kapitel 2.1.1) impliziert ein hoher Wert auch eine große Kollisionswirkung.

$$a_{max} = \max(-a(t), 0 \le t \le \Delta t_{Koll}) \tag{2.3}$$

Das *Occupant Load Criterion* OLC (nach [83] und [84]) betrachtet die Pulswirkung anhand eines einfachen Insassenersatzmodells mit gegebenen Bewegungsrandbedingungen. Dabei repräsentiert das OLC die bei gegebenem Crashpuls $a(t)$ erforderliche konstante Verzögerungswirkung, um den Insassen durch Rückhaltemittel unter Ausnutzung des kompletten Vorverlagerungswegs $s_1 + s_2$ an die Fahrzeuggeschwindigkeit $v(t)$ anzukoppeln. Für die OLC-Berechnung wird davon ausgegangen, dass der als eindimensional bewegliche Masse innerhalb der Fahrgastzelle betrachtete Insasse in der ersten Phase nach Kollisionseintritt zunächst eine definierte Vorverlagerung s_1 relativ zur Fahrgastzelle machen muss, bis Kräfte des Rückhaltesystems eine Verzögerung einleiten und ihn an die Fahrgastzelle ankoppeln können. In dieser Freiflugphase bewegt er sich über Grund ungebremst weiter, während das Fahrzeug und somit die Fahrgastzelle durch die Kollision bereits verzögert wird (siehe auch Abbildung 2-6). Erreicht der Insasse die Vorverlagerung s_1, verbleibt bis zum Kontakt mit harten Fahrgastzellenbegrenzungen der zusätzliche Vorverlagerungsweg s_2. Der OLC-Kennwert entspricht nun ausgehend vom Ankopplungszeitpunkt t_1 der negierten Längsverzögerung, welche erforderlich ist, um den Insassen konstant innerhalb des verbleibenden Vorverlagerungswegs s_2 auf die Fahrzeuggeschwindigkeit abzubremsen („Verzögerungsphase“). Das Vorgehen

bei der Bestimmung des OLC für einen gegebenen Crashpuls $a(t)$ sowie bekannte geometrische Randbedingungen s_1 und s_2 ist in Abbildung 2-7 visualisiert.

Freiflug-phase	Ermittlung der Ankopplungszeit t_1: Solange $\int_0^{t_1}\int_0^{t_1} -a(t)\cdot dt < s_1$, erhöhe t_1
Verzögerungs-phase	Ermittlung des OLC: Solange $\int_{t_1}^{t_2}\left[\frac{\Delta v(t_2)}{t_2-t_1}\cdot(t-t_1)-\Delta v(t)\right]\cdot dt < s_2$, erhöhe t_2 $OLC = -\frac{\Delta v(t_2)}{t_2-t_1} > 0$

Abbildung 2-7: Vorgehen bei der Bestimmung des Occupant Load Criterion

Der Wert des OLC ist bei vorgegebenem Crashpuls $a(t)$ abhängig von den geometrischen Verhältnissen s_1 und s_2 bei der Insassenvorverlagerung. Um mehrere Beschleunigungspulse bei einem Fahrzeug vergleichbar zu machen, lässt sich das OLC auf eine Referenz-Vorverlagerungsgeometrie mit realistisch vorgegebenen Werten für s_1 und s_2 normieren. Da das OLC als Crashschwerekennwert die insassenbezogene Kollisionswirkung unter gegebenen Rahmenbedingungen anhand der modellbasierten Berechnung unmittelbar widerspiegelt und gute Korrelationen zu den anderen Crashschweremaßen bestehen (siehe Kapitel 2.4), wird es in den weitergehenden Überlegungen dieser Arbeit als relevante Crashschweremaßzahl verwendet. Hierbei werden zur Normierung für die Geometrieparameter die Werte $s_1 = 0{,}065\,m$ und $s_2 = 0{,}235\,m$ festgesetzt.

2.2 Struktur und Komponenten

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Komponenten von passiven Systemen zur crashschwereadaptiven Rückhaltesystemansteuerung nach dem Stand der Technik vorgestellt. Hierbei wird das Gesamtsystem in Sensorik (Kapitel 2.2.1), Aktorik (Kapitel 2.2.2) und Algorithmik (Kapitel 2.2.3) untergliedert.

2.2.1 Sensorik

Für die Erfassung der zum passiven Insassenschutz im Rahmen von Crashapplikationen notwendigen Systemgrößen kommen im Fahrzeug Crashsensoren (Kapitel 2.2.1.1) und Innenraumsensoren (Kapitel 2.2.1.2) zum Einsatz. Diese erlauben Rückschluss auf die zu erwartende Crashschwere sowie auf die Anfangsbedingungen der Kollision innerhalb des Fahrzeugs.

2.2.1.1 Crashsensorik

Bei den gegenwärtig in Serienapplikationen verwendeten *Crashsensoren* handelt es sich meist um Beschleunigungs- und Drucksensoren mit elektronischer Signalaufbereitung, die während der mechanischen Wechselwirkung mit dem Kollisionspartner auftretende strukturabhängige Signale messen. Bei der sensoriellen Crashdetektion unterscheidet man zentrale und verteilte Sensierungskonzepte, welche die Kollision auf Basis eines einzelnen Sensors bzw. mehrerer unterschiedlich platzierter Sensoren erfassen [32]. Aufgrund der steigenden Anforderungen an Differenzierungsleistung und Zuverlässigkeit von Crashapplikationen kommen zunehmend verteilte Architekturen zum Einsatz. In Abbildung 2-8 ist exemplarisch ein mit konventionellen Crashsensoren an charakteristischen Positionen ausgestattetes Fahrzeug dargestellt. Je nach Anforderungsspektrum wird oft nur eine Teilmenge der aufgeführten Sensoren verbaut, wobei entsprechend des Fahrzeugtyps, der mechanischen Anbindungsmöglichkeiten und der Detektionsstrategie die Sensorpositionen variieren.

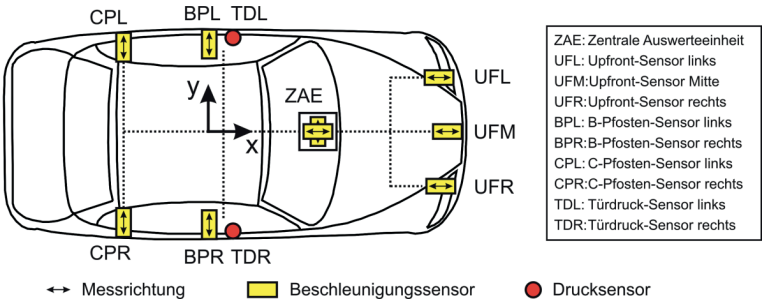

Abbildung 2-8: Crashsensoren im Fahrzeug (in Anlehnung an [143], [150])

Sowohl für die in das üblicherweise fahrgastzellenfeste Airbag-Steuergerät (ZAE, Zentrale Auswerteeinheit) integrierten Sensoren in Längs- und Querrichtung als auch für die peripheren Upfront-Sensoren im Bereich der vorderen Knautschzone sowie die an B- oder C-Säule ausgelagerten Seitensensoren werden heute in der Regel *mikromechanische Beschleunigungsaufnehmer* verwendet. Dabei sind das auf einem kapazitiven Messverfahren arbeitende Sensorelement und die entsprechende Auswerteschaltung in einem elektronischen Bauteil integriert. Durch die Auswerteschaltung werden die Signale des Sensorelements verstärkt und gefiltert und stehen schließlich am Ausgang der Airbag-Elektronik für die weitere Verarbeitung innerhalb lastfalldifferenzierender Auslösealgorithmen (siehe Kapitel 2.2.3) zur Verfügung. Zur schnellen Detektion von Seitenkollisionen kommen *Drucksensoren* zum Einsatz, welche üblicherweise in den Fahrzeugtüren verbaut sind. Sie messen mit Hilfe eines Druckaufnehmers den Druckanstieg bei einem seitlichen Aufprall und bestehen analog zu den Beschleunigungssensoren aus einem mikromechanischen Sensorelement und einem ASIC-Schaltkreis zur Signalaufbereitung und Übertragung des Drucksignals an die Airbag-Elektronik. [82]