

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Methode zur Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme

Stefan Schramm

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

| | |
|--------------------------|---|
| Vorsitzender: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn |
| Prüfer der Dissertation: | 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Heißing (i.R.) 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner |

Die Dissertation wurde am 20.09.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 25.01.2011 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München, im Rahmen des Kooperationsprojektes INI.TUM zwischen der Technischen Universität München und der AUDI AG in Ingolstadt.

Im Besonderen gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Heißing für seine Unterstützung und Förderung sowie für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und damit verbundene Freiheit bei der Ausgestaltung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner danke ich für die Übernahme des Koreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn für die Leitung der Prüfungskommission.

Weiter danke ich Herrn Dr.-Ing. Thorsten Kölzow der mich seitens der AUDI AG fachlich betreute und das Zustandekommen dieser Arbeit ermöglichte. Die zahlreichen Diskussionen haben wesentlich zum erfolgreichen Gelingen dieser Arbeit und zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen. Vielen Dank auch allen Kollegen der Fachabteilung Fußgängerschutz der AUDI AG, der Audi Accident Research Unit und der Volkswagen Unfallforschung für die Unterstützung und wertvollen Anregungen bei der Erstellung der Arbeit.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen vom Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik bedanke ich mich ganz herzlich für die schöne Zeit, die ich mit Ihnen verbringen durfte. Diese war sowohl in fachlicher als auch persönlicher Hinsicht sehr bereichernd, so dass ich mit großer Freude an die Jahre als Doktorand zurückblicke.

Besonderer Dank gilt nicht zuletzt meinen Eltern für die liebevolle Unterstützung, die meinen beruflichen und persönlichen Werdegang maßgeblich beeinflusst hat und es mir immer ermöglichte meinen Weg zu gehen. Herzlichen Dank auch meiner Schwester und meinen Freunden, die alle auf ihre Weise zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Ingolstadt, im März 2011

Stefan Schramm

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|--------------|
| Abbildungsverzeichnis | VIII |
| Verwendete Formelzeichen | XV |
| Abkürzungsverzeichnis | XVIII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Zielsetzung..... | 3 |
| 1.3 Struktur der Arbeit..... | 4 |
| 2 Datenbanken zum Fußgängerunfallgeschehen | 5 |
| 2.1 Verkehrsunfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland | 5 |
| 2.1.1 Erfassungsumfang der amtlichen Verkehrsunfallstatistik | 5 |
| 2.1.2 Definition der amtlichen Verletzungsschwere | 6 |
| 2.1.3 Erkenntnisse aus einer Analyse der amtlichen Verkehrsunfallstatistik..... | 6 |
| 2.2 Unfalldatenbank der German In-Depth Accident Study | 8 |
| 2.2.1 Kriterien zur Aufnahme von Unfällen in die Datenbank..... | 8 |
| 2.2.2 Verletzungsdokumentation nach der Abbreviated Injury Scale | 8 |
| 2.3 Datenbankauswahl zur Abbildung der realen Fußgängerunfallwelt | 10 |
| 2.3.1 Plausibilisierung der Fußgängerunfalldatenbasis..... | 10 |
| 2.3.2 Gliederung der Einzelunfälle in verschiedene Datensätze | 11 |
| 2.3.3 Erkenntnisse aus einer Analyse der Fußgängerunfälle | 12 |
| 3 Aktuelle Bewertungsmethoden von Sicherheitssystemen auf Basis von Realunfalldaten..... | 16 |
| 3.1 Retrospektive und prospektive Systembewertung..... | 16 |
| 3.2 Studie zum Sicherheitsgewinn eines Bremsassistenten in Fußgängerunfällen..... | 18 |
| 3.2.1 Fußgängerunfalldatenbasis für die Untersuchungen..... | 18 |
| 3.2.2 Modellierung passiver Testverfahren zum Fußgängerschutz..... | 18 |
| 3.2.3 Modellierung des Bremsassistenten | 20 |
| 3.2.4 Berechnung des Sicherheitsgewinns..... | 22 |
| 3.2.5 Bewertungsergebnisse | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3 | Bewertungsmethode zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme | 24 |
| 3.3.1 | Unfalldatenbasis für die Untersuchungen | 24 |
| 3.3.2 | Nachbildung realer Unfallabläufe | 25 |
| 3.3.3 | Modellierung des Bremsassistenten | 26 |
| 3.3.4 | Modellierung der automatischen Notbremsfunktion | 27 |
| 3.3.5 | Berechnung des physiologischen Sicherheitsgewinns | 29 |
| 3.3.6 | Bewertungsergebnisse | 31 |
| 3.4 | Bewertung des EuroNCAP-Fußgängerschutztestverfahrens im Realunfallgeschehen..... | 32 |
| 3.4.1 | Fußgängerunfalldatenbasis für die Untersuchungen..... | 33 |
| 3.4.2 | Ermittlung der EuroNCAP-Prüffelder für die Unfallfahrzeuge | 33 |
| 3.4.3 | Zuordnung von Einzelverletzungen zu den EuroNCAP-Prüffeldern | 34 |
| 3.4.4 | Modellierung der Verletzungsschwerereduktion in Abhängigkeit von EuroNCAP-Testergebnissen | 35 |
| 3.4.5 | Bewertungsergebnisse | 37 |
| 4 | PreEffect-iFGS – Methode zur Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme..... | 40 |
| 4.1 | Wirkstrategie und Aufbau integraler Sicherheitssysteme..... | 41 |
| 4.2 | Vorgehen zur Berechnung der Feldeffektivität..... | 43 |
| 4.2.1 | Definition der Kenngröße Feldeffektivität | 43 |
| 4.2.2 | Übersicht der Prozessschritte von PreEffect-iFGS..... | 44 |
| 4.2.3 | Grenzen und Möglichkeiten einer Systembewertung auf Basis von Realunfalldaten..... | 46 |
| 4.3 | Erzeugung der Simulationsdatenbasis aus realen Fußgängerunfalldaten | 47 |
| 4.3.1 | Gruppierung der Einzelunfälle zu sensoräquivalenten Unfalltypen | 48 |
| 4.3.2 | Generierung von Simulationsszenarien für Geradeausunfälle | 50 |
| 4.3.3 | Generierung von Simulationsszenarien für Kurvenunfälle..... | 55 |
| 4.4 | Modellbildung aktiver Teilsystemkomponenten | 56 |
| 4.4.1 | Modellbildung der Sensorik | 57 |
| 4.4.2 | Modellbildung des Funktionsalgorithmus | 60 |
| 4.4.3 | Modellbildung der Aktorik | 62 |
| 4.5 | Berechnung der veränderten Unfallsituationen..... | 75 |
| 4.5.1 | Gesamtsystemsimulation im offenen Regelkreis..... | 75 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.5.2 | Gesamtsystemsimulation im geschlossenen Regelkreis..... | 82 |
| 4.6 | Berechnung der Verletzungsschweren in den veränderten Unfallsituationen | 83 |
| 4.6.1 | Diskrete und risikobasierte Ansätze zur Berechnung von Verletzungsschweren | 84 |
| 4.6.2 | Generierung der Verletzungsrisikofunktionen | 85 |
| 4.7 | Berechnung der Kenngröße Feldeffektivität | 98 |
| 4.7.1 | Untersuchung der Verteilungskonsistenz zwischen Wirkfeld- und Analysedatensatz | 98 |
| 4.7.2 | Berechnung der erwarteten Anzahl MAIS2+ verletzter Fußgänger | 103 |
| 4.7.3 | Umrechnung der Abbreviated Injury Scale in die amtliche Verletzungsschwereklassifikation | 105 |
| 4.7.4 | Berechnung der absoluten und relativen Feldeffektivität..... | 105 |
| 5 | Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme..... | 108 |
| 5.1 | Systembewertung im Entwicklungsprozess..... | 108 |
| 5.1.1 | Definition von Bewertungsfällen in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen..... | 108 |
| 5.1.2 | Bewertungsergebnisse für ausgewählte Systemausprägungen..... | 111 |
| 5.2 | Systembewertung zum Nachweis einer äquivalenten Feldeffektivität und zur Definition von Testverfahren..... | 117 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 122 |
| 7 | Anhang | 125 |
| 8 | Literaturverzeichnis..... | 135 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2-1: Jährliche Entwicklung leichtverletzter, schwerverletzter und getöteter Fußgänger in der Bundesrepublik Deutschland [DESTATIS 2009B, S. 83ff.] | 6 |
| Abbildung 2-2: Amtliche Verletzungsschweren der Fußgänger auf Bundesebene (n=33.423) [DESTATIS 2009B, S83ff.] | 7 |
| Abbildung 2-3: Kollisionsgegner der Fußgänger auf Bundesebene (n=31.541) [DESTATIS 2009A, S. 107] | 7 |
| Abbildung 2-4: Verletzungsschwereklassen der Abbreviated Injury Scale [AAAM 2005, S. 11] | 9 |
| Abbildung 2-5: Empirische Überlebenswahrscheinlichkeit der AIS-Skala [AAAM 2005, S.5] | 9 |
| Abbildung 2-6: Gliederung der Fußgängereinzelfälle aus der In-Depth-Datenbank in verschiedene Datensätze | 11 |
| Abbildung 2-7: Kollisionsgegner der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz | 12 |
| Abbildung 2-8: Ortslage der Fußgängerunfälle im Fußgänger-Gesamtdatensatz | 12 |
| Abbildung 2-9: Kumulierte Häufigkeiten der Ausgangs- und Kollisionsgeschwindigkeiten im Wirkfeld- und Analysedatensatz | 13 |
| Abbildung 2-10: Kumulierte Häufigkeiten der rekonstruierten Bremsverzögerungen im Wirkfeld- und Analysedatensatz | 13 |
| Abbildung 2-11: Amtliche Verletzungsschweren der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz | 14 |
| Abbildung 2-12: Amtliche und AIS-Verletzungsschweren im Analysedatensatz | 14 |
| Abbildung 2-13: Verletzungsschweren der Fußgänger in Abhängigkeit der Stoßkategorie im Analysedatensatz | 15 |
| Abbildung 2-14: Verletzungsschweren der Fußgänger in Abhängigkeit des Sekundärpralls im Analysedatensatz | 15 |
| Abbildung 3-1: Gekoppelter Produktentwicklungs- und Systembewertungsprozess | 17 |
| Abbildung 3-2: Testvorschriften 2003/102/EC Phase 1 [HANNAWALD 2003, S.7] | 19 |
| Abbildung 3-3: Testvorschriften des nicht umgesetzten Entwurfes der EEVC WG 17 [HANNAWALD 2003, S.7] | 19 |
| Abbildung 3-4: Injury-Shift-Methode zur Modellierung des nicht umgesetzten Testverfahrens nach Vorschlag EEVC WG17 in Anlehnung an [Hannawald 2003, S.37] | 20 |
| Abbildung 3-5: Verletzungsrisikofunktionen für die Eintrittswahrscheinlichkeiten einer MAIS2+ bzw. MAIS5+ Verletzung [HANNAWALD 2003, S.38] | 22 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3-6: Bewertungsergebnisse für die Testverfahren 2003/102/EC Phase 1 bzw. Vorschlag EEVC WG 17 und 2003/102/EC Phase 1 mit Bremsassistent [HANNAWALD 2003, S.44f.]..... | 23 |
| Abbildung 3-7: Beschreibung der Kurvengeometrie durch Kurvenradius und Kurvenwinkel [BUSCH 2005, S.46]..... | 25 |
| Abbildung 3-8: Minimum und Maximum der Gierwinkeldifferenz als Ersatzgröße des Kurvenwinkels [BUSCH 2005, S.47] | 25 |
| Abbildung 3-9: Momentaufnahme eines Abbiegeunfalls mit den sechs Handlungsalternativen je Beteiligten und prognostizierten Aufenthaltsorten nach 1,5 Sekunden [BUSCH 2005, S.90]..... | 27 |
| Abbildung 3-10: Wahrscheinlichkeitsfunktion unverletzter Pkw-Insassen für Frontalkollisionen [BUSCH 2005, S.56]..... | 29 |
| Abbildung 3-11: Geglättete Wahrscheinlichkeitsfunktion unverletzter Pkw-Insassen für Frontalkollisionen [BUSCH 2005, S.58]..... | 29 |
| Abbildung 3-12: Vorgehen zur Bestimmung einer Horizontalen für die Monotonisierung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen [BUSCH 2005, S.59] | 30 |
| Abbildung 3-13: Geglättete und monotonisierte Wahrscheinlichkeitsfunktionen für Pkw-Insassen in Frontalkollisionen [BUSCH 2005, S.60]..... | 30 |
| Abbildung 3-14: Verschiedene Konfigurationen der automatischen Notbremsfunktion [BUSCH 2005, S. 101] | 31 |
| Abbildung 3-15: Sicherheitsgewinn durch den Einsatz eines Bremsassistenten und in Kombination mit verschiedenen automatischen Notbremsfunktionen [BUSCH 2005, S. 102] | 32 |
| Abbildung 3-16: Abwickellängen und Begrenzungslinien zur Ermittlung der 60 EuroNCAP-Prüffelder [LIERS 2009, S. 4] | 33 |
| Abbildung 3-17: Anprallstellen und korrespondierende Einzelverletzungen für einen Beispielunfall in Anlehnung an [LIERS 2009, S. 5]..... | 34 |
| Abbildung 3-18: Annahmen zur Höhe des Injury-Shift von Einzelverletzungen für den optimistischen und pessimistischen Bewertungsansatz [LIERS 2009, S. 6]..... | 35 |
| Abbildung 3-19: Anwendung der Injury-Shift-Methode für den pessimistischen Bewertungsansatz [LIERS 2009, S. 7]..... | 36 |
| Abbildung 3-20: Bewertungsergebnisse für idealisierte EuroNCAP-Prüffeldreihen [LIERS 2009, S. 9]..... | 38 |
| Abbildung 3-21: Bewertungsergebnisse für je zwei modellierte 18 und 24 Punkte EuroNCAP-Testergebnisse [LIERS 2009, S. 11]..... | 38 |
| Abbildung 4-1: Einordnung von PreEffect-iFGS in den gekoppelten Produktentwicklungs- und Systembewertungsprozess..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 4-2: Fahrzustände im Prozess der Unfallentstehung und Systemstrategien integraler Sicherheitssysteme in Anlehnung an [WIDMANN 2008], [GOLLEWSKI 2008]..... | 41 |
| Abbildung 4-3: Systemkomponenten eines integralen Sicherheitssystems..... | 42 |
| Abbildung 4-4: Einflussgrößen auf die Feldeffektivität | 44 |
| Abbildung 4-5: Übersicht der Prozessschritte von PreEffect-iFGS..... | 45 |
| Abbildung 4-6: Zusammenhang zwischen Fallzahl bzw. Informationstiefe der GIDAS-Datenbank und der amtlichen Verkehrsunfallstatistik in Anlehnung an [APPEL 2002] | 46 |
| Abbildung 4-7: Schematisches Vorgehen zur Erzeugung der Simulationsdatenbasis..... | 47 |
| Abbildung 4-8: Exemplarische Zuordnung von Einzelunfällen zum sensoräquivalenten Unfalltyp 110.10 | 48 |
| Abbildung 4-9: Kumulierte Häufigkeiten der acht globalen sensoräquivalenten Unfalltypen mit aggregierter Fußgängereinlauffrichtung im Analysedatensatz..... | 49 |
| Abbildung 4-10: Exemplarische Werte zur Parametrisierung sensoräquivalenter Unfalltypen..... | 50 |
| Abbildung 4-11: Modell des Fahrerbremsverhaltens in der ursprünglichen Unfallsituation | 51 |
| Abbildung 4-12: Vorgehen zur Parametrisierung des sensoräquivalenten Unfalltyps 110.09 für einen gebremsten Unfall | 54 |
| Abbildung 4-13: Abweichungen der Kollisionsgeschwindigkeit zwischen Simulationsdatenbasis und In-Depth-Datenbank | 55 |
| Abbildung 4-14: Abweichungen des Anprallortes am Fahrzeug zwischen Simulationsdatenbasis und In-Depth-Datenbank | 55 |
| Abbildung 4-15: Anordnung der aktiven Teilsystemkomponenten im chronologischen Informationsfluss..... | 56 |
| Abbildung 4-16: Prozess zur Verarbeitung der Simulationsrohdaten im Sensormodell und Erzeugung von Objektlisten..... | 57 |
| Abbildung 4-17: Exemplarisches Sensormodell zur Detektion des Fußgängers | 58 |
| Abbildung 4-18: Aufbau der Fußgängerschutztestanlage [ROTH 2008A] | 58 |
| Abbildung 4-19: Fußgängerschutzanlage im Testbetrieb [AUDI 2010]..... | 58 |
| Abbildung 4-20: Ableitung von Testszenarien aus sensoräquivalenten Unfalltypen in Anlehnung an [ROTH 2008A], [ROTH 2009] | 59 |
| Abbildung 4-21: Definition exemplarischer Fußgängertestfälle in Anlehnung an [ROTH 2009] | 59 |
| Abbildung 4-22: Schematisches Vorgehen zur Rückspiegelung der realen Auslösezeiten aus der Erprobung auf die Einzelunfälle der In-Depth-Datenbank | 61 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 4-23: Verzögerungs-, Geschwindigkeits- und Bremswegverlauf für eine Fahrzeugbremsung mit und ohne Bremsassistent [HEIBING 2007]..... | 63 |
| Abbildung 4-24: Auslöseschwellen zur Aktivierung eines Bremsassistenten [KIESEWETTER 1997]..... | 64 |
| Abbildung 4-25: Verzögerungsverlauf zur Modellierung des Bremsassistenten in PreEffect-iFGS..... | 65 |
| Abbildung 4-26: Verzögerungsverlauf zur Modellierung eines autonomen Bremssystems in PreEffect-iFGS..... | 66 |
| Abbildung 4-27: Geschwindigkeit-Zeit-Verlauf eines Fahrzeugs nach Aktivierung eines autonomen Bremssystems | 67 |
| Abbildung 4-28: Weg-Zeit-Verlauf eines Fahrzeugs nach Aktivierung eines autonomen Bremssystems..... | 67 |
| Abbildung 4-29: Zielfunktion für ausgewählte Kombinationen von Referenzkonstantverzögerung a_{ref} und Referenzschwellzeit $t_{s,ref}$ | 70 |
| Abbildung 4-30: Berechnungsergebnisse zur Quantifizierung der Modellannäherung an die realen Messergebnisse durch Lösen des nichtlinearen Optimierungsproblems | 72 |
| Abbildung 4-31: Wirkungsbetrachtung der Systeme Bremsassistent und autonomes Bremssystem in Abhängigkeit des Bremsverhaltens der Fahrzeugführer..... | 73 |
| Abbildung 4-32: Aktivierung eines autonomen Bremssystems vor einer Fahrerbremsung | 74 |
| Abbildung 4-33: Aktivierung eines autonomen Bremssystems während einer Fahrerbremsung | 74 |
| Abbildung 4-34: Aktivierung eines autonomen Bremssystems vor einer Fahrerbremsung mit Aktivierung des Bremsassistenten..... | 74 |
| Abbildung 4-35: Aktivierung eines autonomen Bremssystems während einer Fahrerbremsung mit Aktivierung des Bremsassistenten..... | 74 |
| Abbildung 4-36: Prozessschritte von PreEffect-Open-Loop zur Ermittlung der veränderten Unfallsituationen | 75 |
| Abbildung 4-37: Verzögerungsverläufe im Ursprungsunfall und infolge der Implementierung von Notbremsungen durch ein autonomes Bremssystem | 76 |
| Abbildung 4-38: Geschwindigkeitsverläufe im Ursprungsunfall und infolge der implementierten Notbremsungen durch ein autonomes Bremssystem..... | 76 |
| Abbildung 4-39: Prozess zur Auswertung der Ergebnisdatenbank und Bestimmung der veränderten Kollisionssituation mit PreEffect-Open-Loop | 78 |
| Abbildung 4-40: Zuordnung von Berechnungsergebnissen aus der Ergebnisdatenbank zu einer Auslösezeit t_{anb} | 79 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 4-41: Schematische Veränderungen einer Kollisionssituation unter Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten oder gestaffelten Aktoreffekten..... | 81 |
| Abbildung 4-42: Auswerteprozess der aktiven Teilsystemkomponenten in PreEffect-Closed-Loop zur Ermittlung der veränderten Unfallsituationen..... | 82 |
| Abbildung 4-43: Boxplot des Fußgängeralters in den Verletzungsschwereklassen MAIS1 und MAIS2+ (Analysedatensatz) | 87 |
| Abbildung 4-44: Boxplot Kollisionsgeschwindigkeit in den Verletzungsschwereklassen MAIS1 und MAIS2+ (Analysedatensatz) | 87 |
| Abbildung 4-45: Exemplarisches EuroNCAP-Testergebnis von 18 Punkten [<i>LIERS</i> 2009]..... | 89 |
| Abbildung 4-46: Exemplarisches EuroNCAP-Testergebnis von 24 Punkten [<i>LIERS</i> 2009]..... | 89 |
| Abbildung 4-47: Regressionsparameter und Signifikanzniveau des Likelihood-Quotienten-Tests für den unveränderten Analysedatensatz und die beiden modellierten EuroNCAP-Testergebnisse..... | 91 |
| Abbildung 4-48: Verletzungsrisikofunktion in Abhängigkeit von Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter auf Basis des unveränderten Analysedatensatzes | 92 |
| Abbildung 4-49: Verletzungsrisikofunktion in Abhängigkeit von Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter für das modellierte EuroNCAP-Testergebnis von 18 Punkten im Analysedatensatz..... | 92 |
| Abbildung 4-50 Verletzungsrisikofunktion in Abhängigkeit von Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter für das modellierte EuroNCAP-Testergebnis von 24 Punkten im Analysedatensatz..... | 93 |
| Abbildung 4-51: Gütekriterien der logistischen Regressionsmodelle für den unveränderten Analysedatensatz und die beiden modellierten EuroNCAP-Testergebnisse | 94 |
| Abbildung 4-52: Berechnete Eintrittswahrscheinlichkeiten einer MAIS2+ Verletzung in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit im unveränderten Analysedatensatz..... | 95 |
| Abbildung 4-53: Berechnete Eintrittswahrscheinlichkeiten einer MAIS2+ Verletzung in Abhängigkeit des Fußgängeralters im unveränderten Analysedatensatz | 96 |
| Abbildung 4-54: Kollisionsgegner der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=31.541)..... | 99 |
| Abbildung 4-55: Ortslage der Fußgängerunfälle im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=33.423)..... | 99 |
| Abbildung 4-56: Alter der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=33.423) | 99 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 4-57: Straßenzustände bei Fußgängerunfällen im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene(n=33.423) | 99 |
| Abbildung 4-58: Lichtverhältnisse bei Fußgängerunfällen im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene(n=33.423) | 99 |
| Abbildung 4-59: Amtliche Verletzungsschweren der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=33.423) | 99 |
| Abbildung 4-60: Q-Q-Diagramm der Ausgangsgeschwindigkeit im Wirkfeld- und Analysedatensatz für die Quantile Q_1 bis Q_{10} | 100 |
| Abbildung 4-61: Q-Q- Diagramm der Kollisionsgeschwindigkeit im Wirkfeld- und Analysedatensatz für die Quantile Q_1 bis Q_{10} | 100 |
| Abbildung 4-62: Q-Q-Diagramm der mittleren Bremsverzögerung im Wirkfeld- und Analysedatensatz für die Quantile Q_1 bis Q_{10} | 101 |
| Abbildung 4-63: Q-Q-Diagramm des Fußgängeralters im Wirkfeld- und Analysedatensatz für die Quantile Q_1 bis Q_{10} | 101 |
| Abbildung 4-64: Amtliche Verletzungsschweren der Fußgänger im Wirkfeld- und Analysedatensatz..... | 101 |
| Abbildung 4-65: Erstberührungspunkte der Fußgänger am Fahrzeug im Wirkfeld- und Analysedatensatz..... | 101 |
| Abbildung 4-66: Ortslage der Fußgängerunfälle im Wirkfeld- und Analysedatensatz..... | 102 |
| Abbildung 4-67: Straßenzustände bei Fußgängerunfällen im Wirkfeld- und Analysedatensatz..... | 102 |
| Abbildung 4-68: Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung in Abhängigkeit von einer Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit und modellierten passiven Maßnahmen..... | 104 |
| Abbildung 5-1: Exemplarische Bewertungsfälle für den Einsatz von PreEffect-iFGS in verschiedenen Entwicklungsphasen..... | 109 |
| Abbildung 5-2: Übersicht exemplarischer Systemausprägungen mit verschiedenen Realisierungen der Teilsystemkomponenten..... | 112 |
| Abbildung 5-3: Parameter für die Modelle der Sensorik A und Sensorik B für die Systemausprägungen S3 und S4..... | 113 |
| Abbildung 5-4: Exemplarische Abbildungsvorschrift zur Rückspiegelung der Auslösezeiten auf die Einzelunfälle des Analysedatensatzes..... | 114 |
| Abbildung 5-5: Absolute Feldeffektivitäten für die Systemausprägungen S0 bis S4 bezogen auf den Fußgänger-Pkw-Datensatz | 115 |
| Abbildung 5-6: Kumulierte Häufigkeit der Kollisionsgeschwindigkeiten für die Systemvarianten S0 bis S4 | 116 |
| Abbildung 5-7: Kumulierte Häufigkeit der Kollisionsgeschwindigkeitsreduktionen für die Systemvarianten S1 bis S4 | 116 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 5-8: Übersicht exemplarischer Systemausprägungen mit Realisierungen der Teilsystemkomponenten für eine passive Fahrzeugausstattung von modellierten 24 EuroNCAP-Punkten | 117 |
| Abbildung 5-9: Absolute Feldeffektivitäten für die Systemausprägungen S8 bzw. S9 und S2 bis S4 bezogen auf den Fußgänger-Pkw-Datensatz | 118 |
| Abbildung 5-10: Relative Feldeffektivitäten für die Systemausprägungen S8 bzw. S9 und S2 bis S4 bezogen auf die Feldeffektivität der Variante S9 | 119 |
| Abbildung 7-1: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 110 | 125 |
| Abbildung 7-2: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 111 | 125 |
| Abbildung 7-3: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 210 | 125 |
| Abbildung 7-4: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 211 | 125 |
| Abbildung 7-5: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 310 | 126 |
| Abbildung 7-6: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 311 | 126 |
| Abbildung 7-7: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 410 | 126 |
| Abbildung 7-8: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps Kurven | 126 |
| Abbildung 7-9: Ausprägungen der Fußgängereinlaufrichtung in sensoräquivalenten Unfalltypen | 127 |
| Abbildung 7-10: Anteile sensoräquivalenter Unfalltypen im Analysedatensatz | 127 |

Verwendete Formelzeichen

| | | |
|-----------------------------------|---------------------|---|
| a | [-] | Klassifikationsergebnis |
| a_{fahrer} | [m/s ²] | Konstantverzögerung Fahrerbremsung aus der In-Depth-Datenbank |
| a_g | [g] | Beschleunigungsgrenzwert |
| a_{gidas} | [m/s ²] | Mittlere Bremsverzögerung aus der GIDAS-Datenbank |
| alter | [Jahre] | Fußgängeralter |
| a_{max} | [m/s ²] | Maximal übertragbare Verzögerung |
| a_{ref} | [m/s ²] | Referenzkonstantverzögerung |
| $a_{\text{ref,ug}}$ | [m/s ²] | Untergrenze Referenzkonstantverzögerung |
| a_{soll} | [m/s ²] | Sollkonstantverzögerung |
| E_{MAIS1} | [-] | Anzahl MAIS1 verletzter Fußgänger |
| $E_{\text{MAIS2+}}$ | [-] | Anzahl MAIS2+ verletzter Fußgänger |
| F | [N] | Kraft |
| $fe_{\text{FG-Pkw,absolut},S_j}$ | [-] | Absolute Feldeffektivität im Fußgänger-Pkw-Datensatz für ein System S_j |
| $fe_{\text{analyse,absolut},S_k}$ | [-] | Absolute Feldeffektivität im Analysedatensatz für ein System S_k |
| $fe_{S_j,S_k,\text{relativ}}$ | [-] | Relative Feldeffektivität von System S_j bezogen auf System S_k |
| f_s | [m] | Fehler zwischen Modell und Messung im Bremswegverlauf |
| \bar{f}_s | [m] | Mittlere Abweichungen im Bremswegverlauf |
| f_v | [km/h] | Fehler zwischen Modell und Messung im Geschwindigkeitsverlauf |
| \bar{f}_v | [km/h] | Mittlere Abweichungen im Geschwindigkeitsverlauf |
| G | [-] | Anzahl der Gruppen |
| $g_{a,\text{ref}}$ | [-] | Nebenbedingung für Referenzkonstantverzögerung |
| $g_{ts,\text{ref}}$ | [-] | Nebenbedingung für Referenzschwellzeit |
| grad_{ref} | [m/s ³] | Referenzverzögerungsgradient |
| K | [-] | Stichprobenumfang |
| L | [-] | Likelihood-Funktion |
| L_0 | [-] | Likelihood des Nullmodells |
| L_v | [-] | Likelihood des vollständigen Modells |
| LL | [-] | LogLikelihood-Funktion |
| LL_0 | [-] | LogLikelihood des Nullmodells |
| LL_v | [-] | LogLikelihood des vollständigen Modells |

| | | |
|-----------------------|------|--|
| $-2LL$ | [-] | -2LogLikelihood |
| M | [Nm] | Moment |
| m | [kg] | Masse |
| n | [-] | Anzahl |
| N_{SV+} | [-] | Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger |
| $N_{SV+,analyse}$ | [-] | Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im Analysedatensatz |
| $N_{SV+,analyse,S_j}$ | [-] | Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im Analysedatensatz für ein System S_j |
| $N_{SV+,FG-Pkw}$ | [-] | Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im Fußgänger-Pkw-Datensatz |
| $N_{SV+,wirkfeld}$ | [-] | Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im Wirkfelddatensatz |
| p | [-] | Eintrittswahrscheinlichkeit |
| $p_{kollision}$ | [-] | Kollisionswahrscheinlichkeit |
| p_{MAIS2+} | [-] | Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung |
| $p_{SV+ MAIS1}$ | [-] | Wahrscheinlichkeit für ein mindestens schweres Trauma unter der Bedingung einer MAIS1 Verletzung |
| $p_{SV+ MAIS2+}$ | [-] | Wahrscheinlichkeit für ein mindestens schweres Trauma unter der Bedingung einer MAIS2+ Verletzung |
| $\Delta p_{MAIS2+ A}$ | [-] | Änderung der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung unter der Bedingung passiver Maßnahmen A |
| $\Delta p_{MAIS2+ B}$ | [-] | Änderung der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung unter der Bedingung passiver Maßnahmen B |
| r | [-] | Allgemeiner Grenzwert der Nebenbedingung |
| s | [mm] | Scherweg |
| $s_{0,fg}$ | [m] | Startposition Fußgänger |
| $s_{0,fzg}$ | [m] | Startposition Fahrzeug |
| $s_{b,fzg}$ | [m] | Konstantbremsweg Fahrzeug aus der In-Depth-Datenbank |
| $s_{b,fzg,ges}$ | [m] | Gesamtbremsweg Fahrzeug |
| s_{gidas} | [m] | Bremsweg aus der GIDAS-Datenbank |
| $s_{konst,fzg}$ | [m] | Konstantfahrweg Fahrzeug |
| $s_{messung}$ | [m] | Bremswegverlauf Messung |
| s_{modell} | [m] | Bremswegverlauf Modell |
| t | [s] | Zeit |
| t_0 | [s] | Startzeitpunkt |

Verwendete Formelzeichen

| | | |
|-----------------|--------|--|
| t_{anb} | [s] | Auslösezeitpunkt autonomes Bremssystem |
| t_{aus} | [s] | Auslösezeitpunkt |
| $t_{b,fzg,ges}$ | [s] | Gesamtbremszeit Fahrzeug |
| t_{bas} | [s] | Auslösezeitpunkt Bremsassistent |
| t_e | [s] | Endzeitpunkt |
| $t_{b,fahrer}$ | [s] | Zeitpunkt Fahrerbremsbeginn |
| $t_{kollision}$ | [s] | Kollisionszeitpunkt |
| t_{konst} | [s] | Konstantfahrzeit |
| t_s | [s] | Schwellzeit |
| $t_{s,fahrer}$ | [s] | Schwellzeit Fahrerbremsung |
| $t_{s,ref}$ | [s] | Referenzschwellzeit |
| $t_{s,ref,ug}$ | [s] | Untergrenze Referenzschwellzeit |
| $t_{s,soll}$ | [s] | Sollschwellzeit |
| v | [km/h] | Geschwindigkeit |
| v_0 | [km/h] | Ausgangsgeschwindigkeit |
| $v_{0,fg}$ | [km/h] | Gehgeschwindigkeit Fußgänger aus der In-Depth-Datenbank |
| $v_{0,fzg}$ | [km/h] | Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug |
| v_k | [km/h] | Kollisionsgeschwindigkeit Fahrzeug aus der In-Depth-Datenbank |
| $v_{k,bas}$ | [km/h] | Kollisionsgeschwindigkeit durch den Bremsassistenten |
| $v_{k,gidas}$ | [km/h] | Kollisionsgeschwindigkeit aus der GIDAS-Datenbank |
| vk' | [km/h] | Veränderte Kollisionsgeschwindigkeit |
| $v_{messung}$ | [km/h] | Geschwindigkeitsverlauf Messung |
| v_{modell} | [km/h] | Geschwindigkeitsverlauf Modell |
| Δv | [km/h] | Stoßbedingte Geschwindigkeitsänderung |
| x_r | [m] | Longitudinaler Abstand von der Fahrzeugfront |
| y_r | [m] | Lateraler Abstand von der Fahrzeuginnenachse |
| y | [-] | Ereignis der abhängigen Variable |
| z | [-] | Logit |
| α | [-] | Signifikanzniveau |
| α_k | [grad] | Kniebiegewinkel |
| β | [-] | Regressionskoeffizient |
| β_0 | [-] | Konstante |
| β_{alter} | [-] | Regressionskoeffizient des Fußgängeralters |
| β_{vk} | [-] | Regressionskoeffizient der Kollisionsgeschwindigkeit |
| σ_{fs} | [m] | Standardabweichung Bremswegverlauf |
| σ_{fv} | [km/h] | Standardabweichung Geschwindigkeitsverlauf |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------|--|
| ACEA | Association des Constructeurs Européens d' Automobiles |
| AIS | Abbreviated Injury Scale |
| B | Bewertungsfall |
| BAS | Bremsassistent |
| BASt | Bundesanstalt für Straßenwesen |
| BLE | Bonnet Leading Edge |
| BRD | Bundesrepublik Deutschland |
| BRRL | Bonnet Rear Reference Line |
| EC | European Commission |
| ECE | Economic Commission for Europe |
| EEVC | European Enhanced Vehicle-safety Committee |
| EU | Europäische Union |
| EuroNCAP | European New Car Assessment Programme |
| FAT | Forschungsvereinigung Automobiltechnik |
| FCI | Functional Capacity Index |
| FG | Fußgänger |
| Fzg | Fahrzeug |
| GAM | Generalisierte Additive Modelle |
| GIDAS | German In-Depth Accident Study |
| GT | Getötete/getötet |
| HIC | Head-Injury-Criterion |
| HiL | Hardware-in-the-Loop |
| HPC | Head-Protection-Criterion |
| HUK | Haftpflcht-Unterstützungs-Kasse |
| ISO | International Organization for Standardization |
| ISS | Injury Severity Score |
| 95%-Konf. | 95%-Konfidenzintervall |
| Lkw | Lastkraftwagen |
| LQ-Test | Likelihood-Quotienten-Test |
| LR-Test | Likelihood-Ratio-Test |
| LV | Leichtverletzte/leichtverletzt |
| MAIS | Maximum AIS |
| MZR | Motorisiertes Zweirad |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| PZW | Proportionale Zufallswahrscheinlichkeit |
| Q | Quantil |

| | |
|--------------|--|
| Q-Q-Diagramm | Quantil-Quantil-Diagramm |
| S | Systemausprägung |
| SHT | Schädel-Hirn-Trauma |
| SiL | Software-in-the-Loop |
| SQP | Sequentielle quadratische Programmierung |
| SRL | Side Reference Line |
| SUT | Sensoräquivalenter Unfalltyp |
| SV | Schwerverletzte/schwerverletzt |
| TTC | Time-To-Collision |
| UV | Unverletzte/unverletzt |
| WAD | Wrap Around Distance |
| WG | Working Group |

1 Einleitung

Der Trend der Fahrzeugsicherheit bewegt sich in Richtung eines integralen Ansatzes. Durch diese Strategie erfolgt eine übergreifende Betrachtung fahrzeugseitiger Schutzmaßnahmen im gesamten Unfallverlauf. Hierzu zählen beispielsweise die Erhaltung der Konditionssicherheit des Fahrers durch Assistenz- und Informationssysteme, Ausgabe von Warnungen zur Verdeutlichung kritischer Fahrzustände, autonome Systemeingriffe zur positiven Beeinflussung einer bevorstehenden Unfallsituation, der Einsatz von passiven Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen oder ein automatisches Alarmieren der Rettungsleitstelle [WIDMANN 2008]. Die Analyse veröffentlichter Bewertungsmethoden, welche auf einer Einzelfallanalyse basieren, ergab, dass keines der existierenden Verfahren eine Bewertung integraler Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz mit den geforderten Ansprüchen an Realitätsnähe bzw. einem Einsatz im Entwicklungsprozess ermöglicht. Aus diesem Grund wurde die Bewertungsmethode PreEffect-iFGS entwickelt. Durch diese erfolgt eine Berechnung der Feldeffektivität integraler Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz. Der Fokus lag dabei auf einer Methodenintegration in den Funktionsentwicklungsprozess, so dass eine Bewertung, angefangen von den ersten Systemideen bis hinzu ausgereiften und erprobten Funktionskonzepten, und folglich eine Auslegung von integralen Systemen nach deren Feldeffektivität durchgeführt werden kann.

1.1 Motivation

Unter dem Begriff der Fahrzeugsicherheit wurde bis vor wenigen Jahren im Besonderen der Schutz von Fahrzeuginsassen als größte Gruppe an verletzten und getöteten Unfallbeteiligten verstanden. Die Anstrengungen auf diesem Gebiet führten zu einem sehr hohen Sicherheitsniveau für die Insassen moderner Automobile. Die Reduktion von Unfallopfern seitens der ungeschützten Verkehrsteilnehmer resultierte vor allem aus den Entwicklungen in den Bereichen Infrastruktur, Verkehrserziehung und Rettungswesen [KÜHN 2007, S. 3]. In den letzten Jahren gewann der Fußgängerschutz sowohl in Europa als auch weltweit immer mehr an Bedeutung. Dies begründet sich vor allem durch die europäische Verkehrspolitik, welche eine Halbierung der Verkehrstoten bis zum Jahre 2010, basierend auf der Anzahl tödlich verletzter Personen aus dem Jahr 2001, anstrebt [EUROPÄISCHE KOMMISSION 2001]. Der Fußgänger stellt in Deutschland die drittgrößte und in der EU-19 die zweitgrößte Gruppe tödlich verletzter Verkehrsteilnehmer nach den Fahrzeuginsassen bzw. Motorradfahrern dar [DESTATIS 2009B, S. 6f.], [SAFETYNET 2008]. Daher wurde vom Europäischen Parlament und dem Rat der Europäischen Union im Jahr 2003 eine erste Gesetzesphase erlassen, welche die Gestaltung der Fahrzeugfront, bezüglich deren Kompatibilität bei einem Fußgängeranprall, bewertet [EUROPÄISCHE UNION 2009]. Hierfür wird diese an unterschiedlichen Stellen

mit Impaktoren zur Nachbildung des Kopf-, Hüft- und Beinaufpralls beschossen und biomechanische Messgrößen aufgezeichnet. Diese dürfen definierte Grenzwerte nicht überschreiten, um die EU-Typgenehmigung für ein Fahrzeugmodell zu erhalten. In den Testverfahren von Verbraucherschutzorganisationen, wie zum Beispiel dem EuroNCAP [EURONCAP 2009], wird der fahrzeugseitige Fußgängerschutz ebenfalls mitbewertet. Die Testverfahren des EuroNCAP entsprechen in etwa den gesetzlichen Prüfvorschriften.

In der Zukunft werden zunehmend aktive Sicherheitstechnologien Einzug in die Fahrzeuge finden [WIDMANN 2008], [WYMAN 2007]. Dabei handelt es sich um Systeme, welche bereits vor der eigentlichen Kollision in die Fahrsituation eingreifen, mit dem Ziel den Unfall zu vermeiden bzw. dessen Schwere zu mindern. Eine von der Europäischen Kommission in Auftrag gegebene Studie hat gezeigt, dass sich der Fußgängerschutz durch eine Kombination von aktiven und passiven Schutzmaßnahmen erheblich verbessern lässt, so dass der Einbau von Bremsassistentensystemen im Rahmen der zweiten Phase zur Fußgängerschutzgesetzgebung vorgeschrieben wird. Diese sollen die Systeme der passiven Sicherheit nicht ersetzen, sondern vielmehr ergänzen [EUROPÄISCHE UNION 2009]. Der oben beschriebene Trend in Richtung aktiver Sicherheitstechnologien wird ebenfalls in der zweiten Phase zur Fußgängerschutzgesetzgebung berücksichtigt. Darin wird in Aussicht gestellt, dass für Fahrzeuge, welche mit einem Kollisionsvermeidungssystem ausgestattet sind, die Möglichkeit besteht eine Typzulassung zu erhalten, ohne dass ein Erfüllen der passiven Prüfanforderungen notwendig ist. Hierfür ist der Nachweis zu erbringen, dass die vorgeschlagenen aktiven Maßnahmen eine Schutzwirkung gewährleisten, welche äquivalent zu den passiven Prüfanforderungen ist [EUROPÄISCHE UNION 2009].

Derzeit existieren sowohl in den gesetzlichen Testverfahren als auch in denen des EuroNCAP nur Methoden, um die passive Schutzwirkung eines Fahrzeugs zu bewerten. Dies erfolgt nicht anhand der tatsächlichen Feldeffektivität im Unfallgeschehen, also der Reduktion verletzter Fußgänger, sondern auf Basis biomechanischer Belastungskennwerte, wie dem Head-Injury-Criterion (HIC). Aus diesem Grund wurde die Bewertungsmethode PreEffect-iFGS entwickelt, um die Feldeffektivität, ausgedrückt durch die Reduktion verletzter Fußgänger infolge der Wirkung integraler Sicherheitssysteme, berechnen zu können. Durch das Verfahren erfolgt somit eine Quantifizierung der Leistungsfähigkeit integraler Systemstrategien zum Fußgängerschutz im Realunfallgeschehen und nicht auf Basis von biomechanischen Kennwerten. Die Methode PreEffect-iFGS und die Anwendung des Verfahrens an ausgewählten Bewertungsfällen werden in der nachfolgenden Arbeit dargelegt.

1.2 Zielsetzung

Die fortschreitende Entwicklung der Fahrzeugsicherheit in Richtung einer integralen Betrachtung der Unfallsituation erfordert neue Bewertungsmethoden, um diese Sicherheitssysteme bezüglich deren Leistungsfähigkeit im Realunfallgeschehen bewerten zu können. Diesbezüglich reicht es nicht aus, die Feldeffektivität retrospektiv zu bestimmen, also die Veränderungen in den Unfalldaten Jahre nach der Markteinführung zu analysieren, um auf das Potential des Systems zu schließen. Vielmehr besteht die Herausforderung darin, eine Auslegung der integralen Sicherheitsfunktionen zum Fußgängerschutz nach deren Feldeffektivität bereits im Entwicklungsprozess und somit vor Markteinführung vorzunehmen. Nur auf diese Weise ist auch im Realunfallgeschehen eine hohe Schutzwirkung der Systeme zu erwarten. Es ist daher erforderlich eine prospektive Bewertung des Gesamtsystems in verschiedenen Abstraktionsstufen durchzuführen, um Aussagen zur Feldeffektivität von den ersten Systemideen bis hinzu ausgereiften Gesamtfunktionalitäten treffen zu können.

Neben der Anforderung einer realitätsnahen Prognose der Feldeffektivität im Entwicklungsprozess besteht ein weiteres Ziel der Arbeit darin, unterschiedliche Systemstrategien zum Fußgängerschutz nach deren Feldeffektivität vergleichend bewerten zu können und folglich die Ableitung von Testverfahren für integrale Fußgängerschutzsysteme in Aussicht zu stellen. Dieser Anwendungsfall leitet sich unter anderem aus dem Inhalt der zweiten Phase zur europäischen Fußgängerschutzgesetzgebung ab [EUROPÄISCHE UNION 2009]. Das Ziel war folglich die Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten Bewertungsmethode, welche die oben dargelegten Anforderungen erfüllt und die Möglichkeit schafft, sowohl eine entwicklungsbegleitende als auch gegenüber Prüfinstitutionen argumentativ haltbare Funktionsbewertung durchzuführen. Das Bewertungsverfahren trägt den Namen PreEffect-iFGS, welcher sich aus einer Prognose der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme ableitet.

Es wird darauf hingewiesen, dass das Ziel dieser Arbeit nicht darin bestand, ein integrales Sicherheitssystem zum Fußgängerschutz zu entwickeln oder auszulegen, sondern eine Bewertungsmethode bereitzustellen, durch welche unterschiedliche Systemkonfigurationen bewertet werden können und die daraus resultierenden Erkenntnisse entweder in die Komponentenentwicklung einfließen oder zum Nachweis einer äquivalenten Feldeffektivität Einsatz finden. Ebenso wird in dieser Arbeit kein konkretes Testverfahren zur Berücksichtigung integraler Sicherheitssysteme im Prozess der Typzulassung oder in Verbraucherschutztests vorgeschlagen, sondern die Anwendung von PreEffect-iFGS für diese Fragestellung exemplarisch vorgestellt.

1.3 Struktur der Arbeit

In Kapitel 2 erfolgt eine Darstellung unterschiedlicher Datenbanken zum Fußgängerunfallgeschehen. Die Intention dieses Kapitels besteht in der Identifikation einer geeigneten Erhebung, aus welcher das Abbild der realen Fußgängerunfallwelt entnommen und in PreEffect-iFGS integriert wird. Darüber hinaus erfolgte eine Plausibilisierung, Strukturierung und Analyse der Fußgängerunfalldaten als Vorbereitung für die weitere Methodenentwicklung. Der Inhalt von Kapitel 3 gibt einen Überblick zu aktuellen prospektiven Bewertungsmethoden für unterschiedliche Sicherheitssysteme, welche auf Realunfalldaten basieren und nach der Methode einer Einzelfallanalyse durchgeführt werden.

In Kapitel 4 wird die Bewertungsmethode PreEffect-iFGS erläutert. Darin werden unter anderem die Kenngröße der Feldeffektivität und deren Berechnungsvorschrift festgelegt. Weiter erfolgt eine Erläuterung der Vorgehensweise zur automatisierten Erzeugung der Simulationsdatenbasis als Abbild der realen Unfallwelt, auf welcher die Systembewertungen durchgeführt wurden. Die Berücksichtigung aktiver Teilsystemkomponenten integraler Sicherheitssysteme, repräsentiert durch Sensorik, Funktionsalgorithmus und Aktorik, erfordert einen Modellbildungsprozess, um die einzelnen Bausteine in den Bewertungsprozess einzubinden. Im Zuge dessen wird für jede Komponente auch erläutert, wie Erkenntnisse aus der realitätsnahen Erprobung berücksichtigt wurden. Die Berechnung der veränderten Unfallsituationen infolge der aktiven Teilsystemkomponenten erfolgt durch ein Softwareprogramm, welches sich als Standardlösung im Bereich der Unfallforschung durchgesetzt hat. Dieses wurde in zwei übergeordnete Simulationsverfahren, bezeichnet als PreEffect-Open-Loop und -Closed-Loop eingebunden. In diese werden zum einen die Modelle der aktiven Teilsystemkomponenten integriert. Zum anderen erfolgt darüber die Ansteuerung des obengenannten Softwareprogramms. Basierend auf den daraus resultierenden veränderten Kollisionssituationen werden die neuen Verletzungsschweren der Fußgänger berechnet. Hierfür erfolgt der Einsatz von Verletzungsrisikofunktionen, durch welche zugleich die fahrzeugseitigen passiven Fußgängerschutzmaßnahmen modelliert werden. Deren Güte wird durch Testergebnisse nach dem Fußgängerschutz-Testprotokoll des EuroNCAP quantifiziert.

In Kapitel 5 wird der Einsatz von PreEffect-iFGS für die beiden in Kapitel 1.2 beschriebenen Anwendungsfälle aufgezeigt. Im ersten Schritt erfolgt eine Berechnung der Feldeffektivität für exemplarische Systemausprägungen analog einem Einsatz im Entwicklungsprozess. Im zweiten Schritt wird verdeutlicht, wie die entwickelte Bewertungsmethode für eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Systemstrategien zum Fußgängerschutz und eine Ableitung von Testverfahren für integrale Systeme verwendet werden kann.

2 Datenbanken zum Fußgängerunfallgeschehen

Für eine Bewertung bestehender bzw. künftiger Technologien im gesamten Bereich der Fahrzeug- und Verkehrssicherheit werden Unfalldatenbanken benötigt, da diese ein Abbild der realen Unfallwelt darstellen. Diesbezüglich werden zwei Arten von Datenbanken unterschieden. Auf der einen Seite existieren nationale Unfallstatistiken. Diese beinhalten Informationen über Kollisionen, welche in der Regel von den Polizeidienststellen aufgenommen und an zentrale Institutionen gemeldet werden. Für eine aggregierte Darstellung nationaler Unfallstatistiken wurde Ende der achtziger Jahre die International Road Traffic And Accident Database [IRTAD 2009] etabliert. Diese umfasst Informationen zum Unfallgeschehen der Mitgliedsländer, so dass ein Vergleich des internationalen Verkehrsunfallgeschehens möglich wurde. Auf der anderen Seite existieren sogenannte In-Depth-Erhebungen, wie die Unfalldatenbank des Projektes GIDAS. Diese beinhalten weitaus detailliertere Informationen zu den aufgenommenen Unfallsituationen. Eine Übersicht bestehender In-Depth-Unfalldatenbanken ist in [HANNAWALD 2008, S. 21ff.] aufgeführt. Um eine Datenbank zur Nachbildung der realen Unfallwelt in PreEffect-iFGS auszuwählen, werden nachfolgend zum einen die amtliche Verkehrsunfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland und zum anderen die Unfalldatenbank des Projektes GIDAS als Repräsentanten für eine nationale und In-Depth-Erhebung näher erläutert.

2.1 Verkehrsunfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland

Eine Veröffentlichung von Informationen zum Unfallgeschehen auf deutschen Straßen erfolgt jährlich durch das Statistische Bundesamt in Wiesbaden in Form der amtlichen Verkehrsunfallstatistik. Nachfolgend werden daher der Erhebungsumfang und daraus entnehmbare Informationen dargestellt.

2.1.1 Erfassungsumfang der amtlichen Verkehrsunfallstatistik

Eine Erhebung von Unfällen für die amtliche Verkehrsunfallstatistik erfolgt nach dem Inlandskonzept. Unabhängig von der Nationalität der Unfallbeteiligten werden Unfälle und Verunglückte registriert, welche auf deutschen Straßen auftreten. Berücksichtigung erfahren alle von der Polizei registrierten Straßenverkehrsunfälle, in welchen infolge des Fahrverkehrs auf öffentlichen Wegen oder Plätzen entweder Personen verletzt bzw. getötet werden oder Sachschaden entstanden ist. Dabei handelt es sich vor allem um Kollisionen mit schwereren Folgen. Für leichtere Unfallsituationen zwischen zwei Fahrzeugen mit nur geringem Sachschaden erfolgt zu einem Großteil keine polizeiliche Erfassung, weil diese von den Be-

teiligten direkt über die Versicherungsgesellschaften abgewickelt werden. Als Konsequenz erfahren diese Konfliktsituationen keine Dokumentation in der amtlichen Unfallstatistik. Weiter schränkt sich die Erfassung auf Unfälle ein, die infolge des Fahrverkehrs entstanden sind. Zusammenstöße an denen nur Fußgänger beteiligt sind werden daher nicht die Unfallstatistik aufgenommen [DESTATIS 2009A, S.9].

2.1.2 Definition der amtlichen Verletzungsschwere

Bei Unfällen, in denen Personen zu Schaden kommen, erfolgt im Rahmen der amtlichen Unfallaufnahme eine Klassifikation und Dokumentation der Verletzungsschweregrade in drei Ausprägungen. Unterschieden werden diesbezüglich Leicht- bzw. Schwerverletzte und Getötete. Der Gruppe der Leichtverletzten werden Personen zugeordnet, welche infolge der Konfliktsituation eine ambulante Behandlung erfahren haben. Schwerverletzte werden durch die Aufnahme in ein Krankenhaus zur stationären Behandlung für mindestens 24 Stunden charakterisiert. Zu den Getöteten zählen Personen, welche innerhalb von 30 Tagen an den Unfallfolgen sterben [DESTATIS 2009A, S.10].

2.1.3 Erkenntnisse aus einer Analyse der amtlichen Verkehrsunfallstatistik

In der Bundesrepublik Deutschland verunglückten im Jahr 2008 33.423 Fußgänger bei Verkehrsunfällen. Davon wurden 653 tödlich verletzt. Damit bildeten die getöteten Fußgänger nach den Pkw-Insassen (2.368) und Motorradfahrern (656) die drittgrößte Gruppe an Verkehrsteilnehmern mit tödlichen Verletzungen [DESTATIS 2009B, S. 6f.].

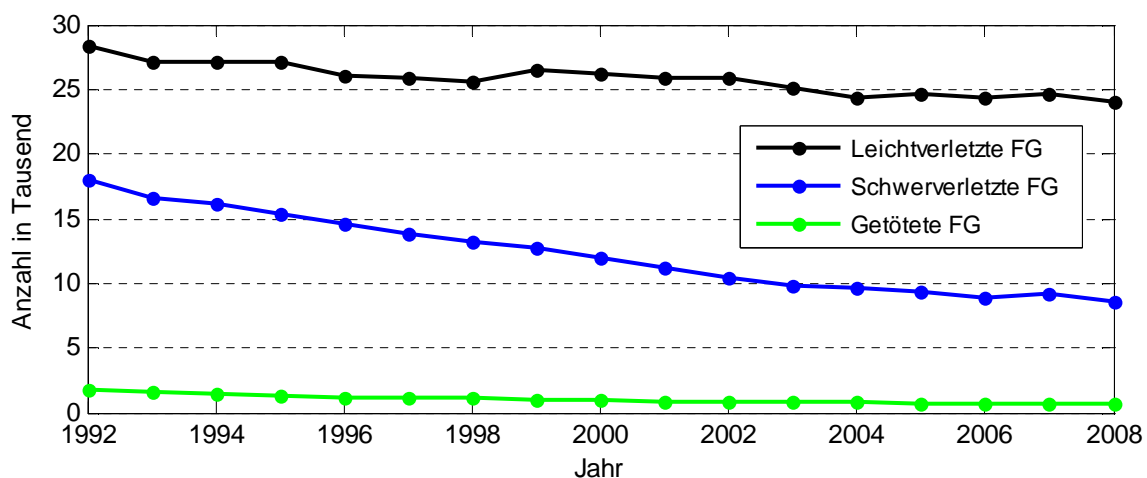


Abbildung 2-1: Jährliche Entwicklung leichtverletzter, schwerverletzter und getöteter Fußgänger in der Bundesrepublik Deutschland [DESTATIS 2009B, S. 83ff.]

2. Datenbanken zum Fußgängerunfallgeschehen

Die jährliche Entwicklung der Verunglücktenzahlen ab dem Jahr 1992 ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Daraus ist ein tendenziell abnehmender Trend zu erkennen, der nach [KÜHN 2007, S.21ff.] auf die Maßnahmen in den Bereichen Infrastruktur, Verkehrserziehung und einer verbesserten Notfallmedizin zurückzuführen ist. Trotz dieser positiven Entwicklung kommt dem Fußgängerunfall eine steigende Bedeutung zu. Dies zeigt eine Gegenüberstellung der Anteile an den Verletzungsschwereklassen von Pkw-Insassen und Fußgängern. Für Fußgänger ergibt sich eine Verteilung der Verletzungsschweren auf die drei amtlichen Traumaklassen analog Abbildung 2-2. Danach haben sich 72% der verunfallten Fußgänger leicht, 26% schwer und 2% tödlich verletzt. Bei den Pkw-Insassen zeigt sich eine Verteilung von etwa 85% leichtverletzten, 14% schwerverletzten und 1% getöteten Personen [DESTATIS 2009B, S83ff.]. Die deutliche Verschiebung in Richtung höherer Verletzungen begründet sich dadurch, dass es sich bei den Fußgängern um ungeschützte Verkehrsteilnehmer handelt, für welche das Risiko schwere oder tödliche Verletzungen zu erleiden deutlich ansteigt.

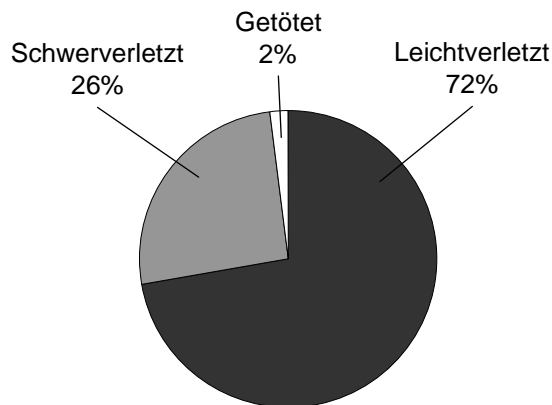


Abbildung 2-2: Amtliche Verletzungsschweren der Fußgänger auf Bundesebene (n=33.423) [DESTATIS 2009B, S83ff.]

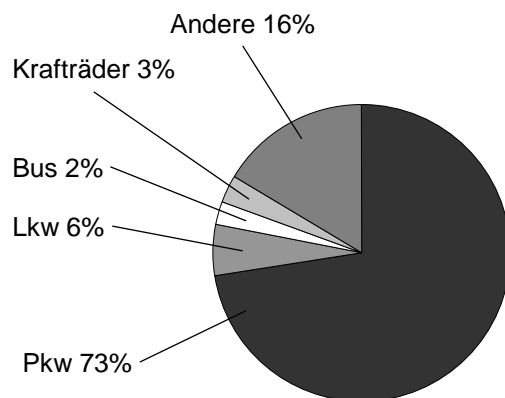


Abbildung 2-3: Kollisionsgegner der Fußgänger auf Bundesebene (n=31.541) [DESTATIS 2009A, S.107]

Eine Betrachtung der Verletzungsschwere nach Ortslage ergibt, dass sich 96% der Unfälle mit leicht- und 93% der Kollisionen mit schwerverletzten Fußgängern im innerstädtischen Bereich ereignen. Bei den Getöteten ist mit 28% Außerortsanteil eine deutliche Verschiebung zu erkennen, was sich durch die im Allgemeinen höheren Kollisionsgeschwindigkeiten begründet. Eine Auswertung der Unfalldaten bezüglich der Kollisionsgegner der Fußgänger zeigt Abbildung 2-3. Dieser ist zu entnehmen, dass etwa drei Viertel der Fußgänger mit einem Pkw kollidieren, gefolgt von 13% Fahrradfahrern, welche in Abbildung 2-2 den anderen Kollisionsgegnern zugeordnet sind. Diese Analyseergebnisse korrelieren mit der Ortslage. Der Großteil der Unfälle ereignet sich mit 94% im innerstädtischen Bereich, welcher den typischen Verkehrsraum für Fußgänger, Personenkraftwagen und Fahrradfahrer darstellt.

2.2 Unfalldatenbank der German In-Depth Accident Study

In Deutschland erfolgt die umfangreichste Erhebung von In-Depth-Unfalldaten durch das Projekt GIDAS (German In-Depth Accident Study), welches im Juli 1999 gegründet wurde. Dieses basiert auf einem Gemeinschaftsvorhaben zwischen der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Die Datenerhebung erfolgt in den Großräumen Dresden und Hannover. In Summe decken die beiden Erhebungsgebiete eine Fläche von etwa 5.000 Quadratkilometern mit einer Bevölkerungszahl von über zwei Millionen Einwohnern ab [GIDAS 2009].

2.2.1 Kriterien zur Aufnahme von Unfällen in die Datenbank

Die Entscheidung über die Aufnahme eines von der Polizei, Feuerwehr oder den Rettungsdienstleitstellen gemeldeten Unfalls in die Datenbank erfolgt durch Anwendung eines statistischen Stichprobenplans. Eine Integration erfolgt nur, wenn der Unfall innerhalb des Erhebungsgebietes und der Erhebungszeit liegt und weiter mindestens eine beteiligte Person verletzt wird. Nach diesem Verfahren werden jährlich etwa 2.000 Unfälle aufgenommen, wobei für jeden Fall eine ausführliche Dokumentation zu Umgebungsbedingungen, Fahrzeugdeformationen, Anprallstellen, Kennwerten der Pre-Crash-Phase und Verletzungen erfolgt. Insgesamt werden auf diese Weise bis zu 3.000 Einzelparameter je Unfall erhoben [GIDAS 2009]. Eine der wichtigsten Informationen stellt die Verletzungsdokumentation verunfallter Personen dar, da aus dieser Rückschlüsse auf die Entstehung von Traumata gezogen werden können. Diese erfolgt in der GIDAS-Datenbank zum einen nach amtlicher Definition (Kapitel 2.1.2) und zum anderen nach der Abbreviated Injury Scale.

2.2.2 Verletzungsdokumentation nach der Abbreviated Injury Scale

Die Abbreviated Injury Scale (AIS) stellt eine Bewertungsskala für die Klassifikation von Einzelverletzungen auf Basis deren anatomischer Entstehung dar. Die Einzelverletzungen werden dabei in Klassen ähnlicher Letalitätssrate zusammengefasst. Insgesamt existieren die sechs Verletzungsschwereklassen AIS1 bis AIS6 (Abbildung 2-4). Weiter gibt es die Einteilung AIS9 für Verletzungen, welche nicht eindeutig bestimmbar sind und die Klassifikation AIS0 für unverletzte Personen. Die Korrelation zwischen AIS-Verletzungsschwere und Überlebenswahrscheinlichkeit ist Abbildung 2-5 zu entnehmen. Daraus ist zum einen der nicht lineare Zusammenhang zwischen den verschiedenen AIS-Verletzungsschweren zu erkennen und zum anderen, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit eine sehr valide Proxyvariable für die Klassifikation von Verletzungen nach der AIS darstellt [AAAM 2005, S. 4ff.]. Die Ver-

letzungsschwereklassen Eins bis Sechs inklusive unverletzter Personen (AIS0) bilden daher eine ordinal skalierte Rangfolge mit sinkender Überlebenswahrscheinlichkeit. Auf Basis der AIS-Klassifikation besteht die Möglichkeit Einzelverletzungen unterschiedlicher Körperregionen zu vergleichen, da einer AIS2 Kopfverletzung die gleiche Überlebenswahrscheinlichkeit zugeordnet ist wie einer AIS2 Thoraxverletzung. Die Einstufung von Einzelverletzungen in die AIS erfolgt über den sogenannten Numerical Injury Identifier. Dieser besteht aus einem sechsstelligen Code, aus welchem die AIS-Verletzungsschwere über die Körperregion, anatomische Struktur und Verletzungsart identifiziert wird [AAAM 2001, S. 10].

| AIS-Wert | Beschreibung |
|----------|--------------|
| 1 | Minor |
| 2 | Moderate |
| 3 | Serious |
| 4 | Severe |
| 5 | Critical |
| 6 | Maximum |

Abbildung 2-4: Verletzungsschwereklassen der Abbreviated Injury Scale [AAAM 2005, S. 11]

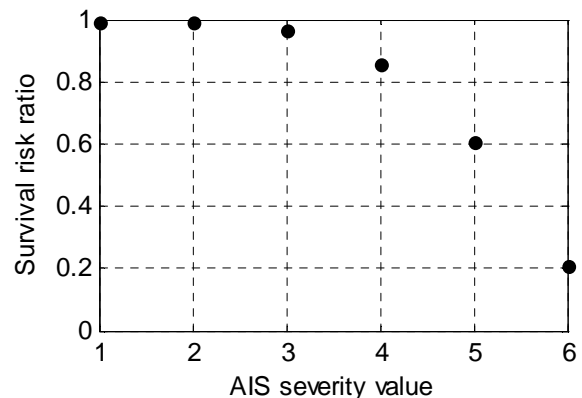


Abbildung 2-5: Empirische Überlebenswahrscheinlichkeit der AIS-Skala [AAAM 2005, S.5]

Zur Bewertung multipler Verletzungen beinhaltet die Abbreviated Injury Scale den sogenannten MAIS-Wert. Der MAIS ist definiert als die höchste AIS-Verletzungsschwere einer Person. Zu beachten ist, dass dieser keine Aussagen über die Überlebenswahrscheinlichkeit von Personen in Folge eines Polytrauma macht, da der Einfluss mehrerer Verletzungen auf die Überlebenswahrscheinlichkeit nicht berücksichtigt wird. Die Letalitätsrate einer Person mit beispielsweise drei AIS4 Verletzungen ist mit Sicherheit höher, als bei einer Person mit einer AIS4 Verletzung. In beiden Fällen erhält die Person einen MAIS-Wert von Vier. Durch den MAIS erfolgt daher eine Abschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeit nach oben. Einen weiteren Kennwert zur Berücksichtigung von mehrfach verletzten Personen stellt der Injury Severity Score (ISS) dar. Der ISS berechnet sich aus der Summe der Quadrate der höchsten AIS-Verletzungsschweren in drei verschiedenen Körperregionen. Dabei ist zu beachten, dass sich die Körperregionen des ISS unter Umständen von denen des AIS-Wertes unterscheiden. In zukünftigen Entwicklungsstufen der Abbreviated Injury Scale ist geplant den Numerical Injury Identifier um einen Functional Capacity Index (FCI) zu erweitern, welcher die Spätfolgen erlittener Verletzungen dokumentiert [AAAM 2005, S. 15ff.].

2.3 Datenbankauswahl zur Abbildung der realen Fußgängerunfallwelt

In den vorangegangenen Ausführungen von Kapitel 2 werden die Erhebungsmethoden der amtlichen Verkehrsunfallstatistik und des Projektes GIDAS, als Repräsentanten einer nationalen bzw. In-Depth-Erhebung, vorgestellt. Zusätzlich erfolgt eine Auswertung von Kollisionsparametern aus der amtlichen Unfallstatistik. Diese macht deutlich, dass der Detaillierungsgrad einer nationalen Unfallstatistik für wissenschaftliche Analysen der Unfallsituationen nicht ausreicht. Hierfür sind Informationen zu Unfallentstehung, Unfallablauf, Fahrzeugbeschädigungen und Verletzungsmechanismen erforderlich, welche nur von In-Depth-Erhebungen bereitgestellt werden. Da die GIDAS-Datenbank eine der umfangreichsten In-Depth-Unfalldatenbanken darstellt und im Rahmen dieser Arbeit der Zugriff darauf möglich war, werden die darin enthaltenen Fußgängerunfälle als Abbild des Realunfallgeschehens in PreEffect-iFGS integriert.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die entwickelte Bewertungsmethode unabhängig von den zugrundeliegenden Unfalldaten ist. Bei einer theoretischen Methodenentwicklung ohne Berücksichtigung tatsächlich verfügbarer Informationen aus der In-Depth-Erhebung besteht die Möglichkeit, dass von der Bewertungsmethode Eingangsp Parameter vorausgesetzt werden, die in keiner Unfalldatenbank zu finden sind und PreEffect-iFGS daher nicht anwendbar ist. Aus diesem Grund orientierte sich die Entwicklung der Methode für diejenigen Komponenten, welche auf Informationen einer Unfalldatenbank basieren, an den verfügbaren Angaben der GIDAS-Datenbank.

2.3.1 Plausibilisierung der Fußgängerunfalldatenbasis

Zur Einbindung von Realunfalldaten in PreEffect-iFGS werden hohe Anforderungen an die Vollständigkeit und Plausibilität der Daten gestellt. Eine Analyse der erhobenen Fußgängerunfälle aus der In-Depth-Datenbank hat ergeben, dass sich darunter auch fehlende, unbekannte oder unplausible Unfallparameter befinden. Diese Erkenntnis zeigt sich auch in den Analysen nach [HANNAWALD 2008, S. 61] für Pkw-Pkw-Kollisionen, welche ebenfalls der GIDAS-Datenbank entnommen wurden. Um die Fußgängerunfälle mit unvollständigen Unfallparametern zu identifizieren, erfolgt eine Plausibilitätsprüfung. Diese Plausibilisierung ist möglich, da sich zum einen für ausgewählte Parameter sachlogisch plausible Wertebereiche definieren lassen. Zum anderen sind Informationen zu Umgebung, Fahrzeug oder den verletzten Fußgängern in der Datenbank redundant codiert. Unter Berücksichtigung dieser redundanten Informationen wird eine Kreuzvalidierung zur Überprüfung interner Konsistenzen durchgeführt. Ein Beispiel hierfür stellen Informationen zum beteiligten Fahr-

zeug dar. Einerseits enthalten die Daten die amtliche Fahrzeugklasse und andererseits das exakte Fahrzeugmodell des Beteiligten. Aus einem zueinander in Bezugsetzten dieser beiden Größen werden Inkonsistenzen identifiziert. Ähnlich stellt es sich für die Lokalisierung von Unplausibilitäten bezüglich Unfalltyp, Einlaufrichtung und Anprallort des Fußgängers am Fahrzeug dar. Analog diesem Vorgehen lassen sich weitere Prüfbedingungen formulieren. Die Erkenntnisse aus dem Plausibilisierungsprozess führen dazu, dass nicht alle Fußgänger-Pkw-Unfälle, welche durch ein vorwärts fahrendes Fahrzeug verursacht werden, für die weiteren Analyseschritte herangezogen werden können. Der Umgang mit Einzelunfällen, welche nicht für eine Erzeugung der Simulationsdatenbasis oder einer Analyse der Wirkungsweise integraler Sicherheitssysteme berücksichtigt werden, erfolgt in Kapitel 4.7.

2.3.2 Gliederung der Einzelunfälle in verschiedene Datensätze

Für die exemplarisch herangezogenen Unfalldaten aus der In-Depth-Datenbank erfolgte eine Aufteilung in unterschiedliche Datensätze (Abbildung 2-6), auf welche im Verlauf der Methodenentwicklung zurückgegriffen wurde. Der Fußgänger-Gesamtdatensatz beinhaltet alle Kollisionen, an denen ein Fußgänger beteiligt ist. Unter Berücksichtigung der zu bewertenden Systemstrategie (Kapitel 4.1) wird dieser weiter untergliedert. Aus der Einschränkung auf Kollisionsgegner der Fußgänger, für welche eine Analyse der Fahrzeugausstattung mit einem integralen Sicherheitssystem erfolgt, resultiert der Fußgänger-Pkw-Datensatz. Dieser beinhaltet Kollisionen, an denen ein Pkw der Klasse M1 beteiligt ist. Eine weitere Untergliederung erfolgt durch Einbeziehung des generellen Wirkungfeldes des zu analysierenden Sicherheitssystems. Mit dem Vorwissen, dass ein Frontschutzsystem zu untersuchen ist, wird aus dem Fußgänger-Pkw-Datensatz der Wirkungfeldatensatz abgeleitet. Dieser beinhaltet Kollisionen, in welchen die Personenkraftwagen vorwärts gefahren sind.

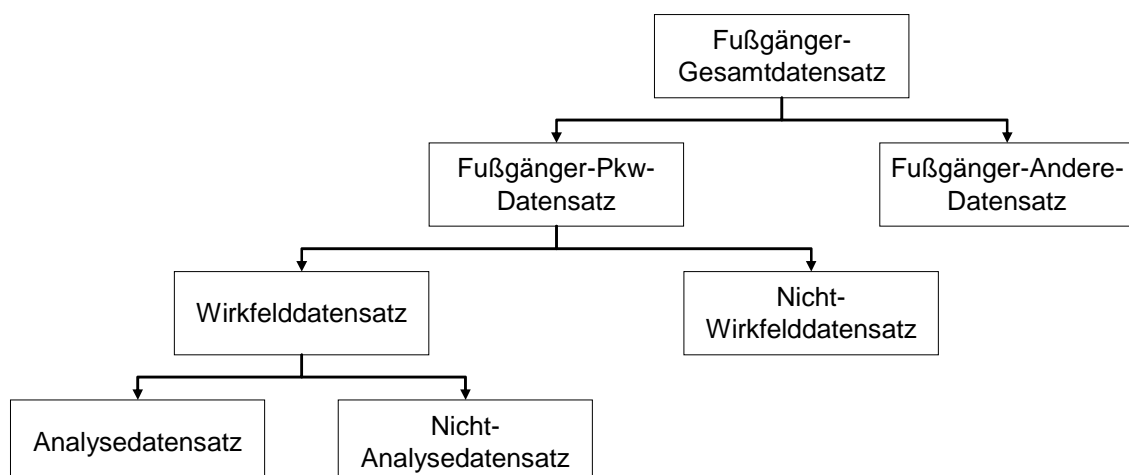


Abbildung 2-6: Gliederung der Fußgängereinzelfälle aus der In-Depth-Datenbank in verschiedene Datensätze

Auf Grund der im vorherigen Kapitel erläuterten Plausibilisierungsschritte können nicht alle Einzelfälle des Wirkfelddatensatzes für die Analysen herangezogen werden. Als Untermenge des Wirkfelddatensatzes beinhaltet der Analysedatensatz daher nur Kollisionssituationen mit vollständigen und plausiblen Unfallparametern. Dem Nicht-Analysedatensatz werden folglich solche Unfälle zugeordnet, welche durch ein vorwärts fahrendes Fahrzeug verursacht, aber auf Grund fehlender Unfallparameter nicht in die Berechnungen einbezogen werden. Im Nicht-Wirkfelddatensatz befinden sich alle verbleibenden Fußgänger-Pkw-Kollisionen.

2.3.3 Erkenntnisse aus einer Analyse der Fußgängerunfälle

Eine Auswertung oben dargestellter Fußgängerdatensätze nach selektiven Unfallparametern erfolgt aus zwei Gründen. Zum einen wird daraus der hohe Detaillierungsgrad der In-Depth-Datenbank verdeutlicht und zum anderen wurden die daraus ableitbaren Erkenntnisse für die Methodenentwicklung benötigt. Abbildung 2-7 zeigt eine Verteilung des Kollisionsgegners auf Basis des Fußgänger-Gesamtdatensatzes. Die Einteilung der Fahrzeugklassen orientiert sich an der ECE-Klassifikation [GIDAS 2008, S. 292f.]. Daraus ist zu erkennen, dass in mehr als drei Viertel aller Fußgängerunfälle ein Personenkraftwagen der Klasse M1 beteiligt ist. Eine Auswertung der Ortslage (Abbildung 2-8) zeigt, dass 96% der Fußgänger im innerstädtischen Bereich und 4% außerorts verunfallen. Dies begründet sich aus dem typischen Verkehrsraum der Fußgänger, welcher sich in der innerstädtischen Region befindet. Im Unterschied zur amtlichen Verkehrsunfallstatistik enthalten In-Depth-Unfalldatenbanken auch sehr detaillierte Informationen zu den Konfliktsituationen. Dies wird am Beispiel der Pre-Crash-Parameter deutlich. In Abbildung 2-9 sind die kumulierten Häufigkeiten der Ausgangs- und Kollisionsgeschwindigkeiten für den Wirkfeld- und Analysedatensatz dargestellt.

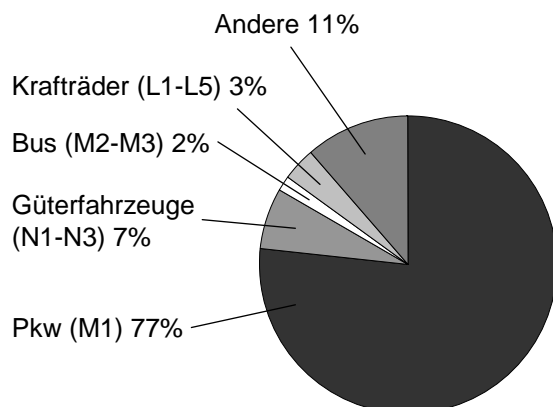


Abbildung 2-7: Kollisionsgegner der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz

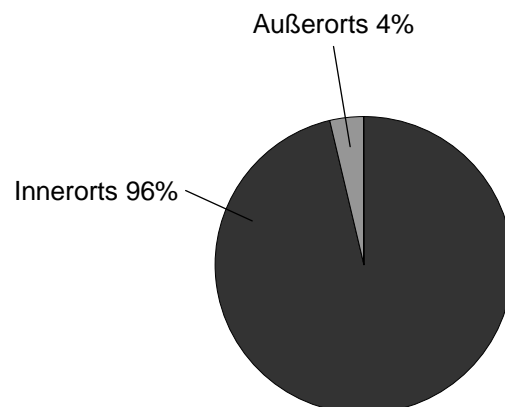


Abbildung 2-8: Ortslage der Fußgängerunfälle im Fußgänger-Gesamtdatensatz

2. Datenbanken zum Fußgängerunfallgeschehen

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass etwa 80% der Unfälle mit Kollisionsgeschwindigkeiten bis 40 km/h stattfinden. Eine gute Korrelation zur Verteilung der Ortslage wird bei einer Betrachtung der Ausgangsgeschwindigkeit deutlich. In etwa 93% der Fälle besitzen die beteiligten Pkw eine Ausgangsgeschwindigkeit unter 60 km/h. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den Unfalldaten auch Informationen zum Bremsverhalten des Fahrers zu entnehmen. In Abbildung 2-10 ist die Verteilung der rekonstruierten Bremsverzögerung dargestellt. Demnach ereignen sich rund 40% aller Unfälle ohne einen Fahrerbremseneingriff.

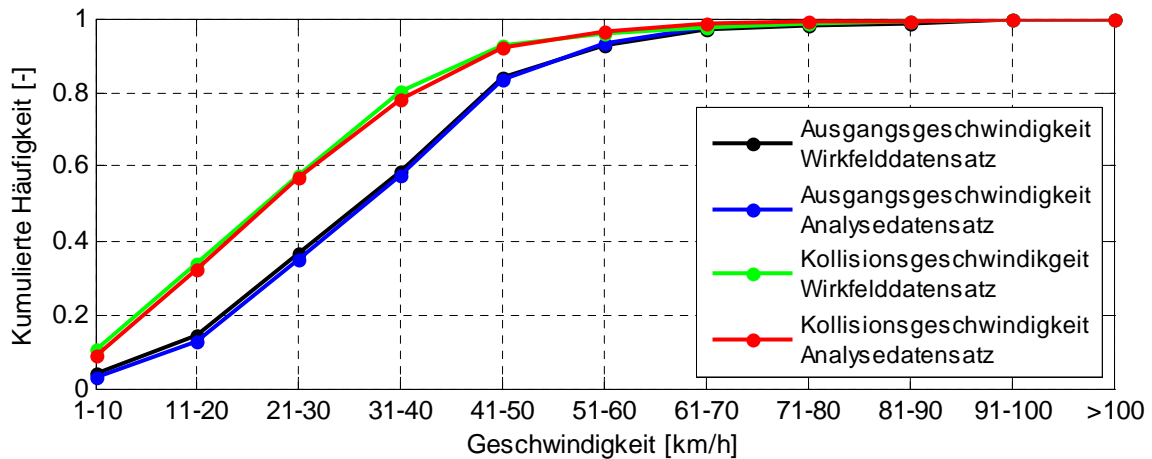


Abbildung 2-9: Kumulierte Häufigkeiten der Ausgangs- und Kollisionsgeschwindigkeiten im Wirkfeld- und Analysedatensatz

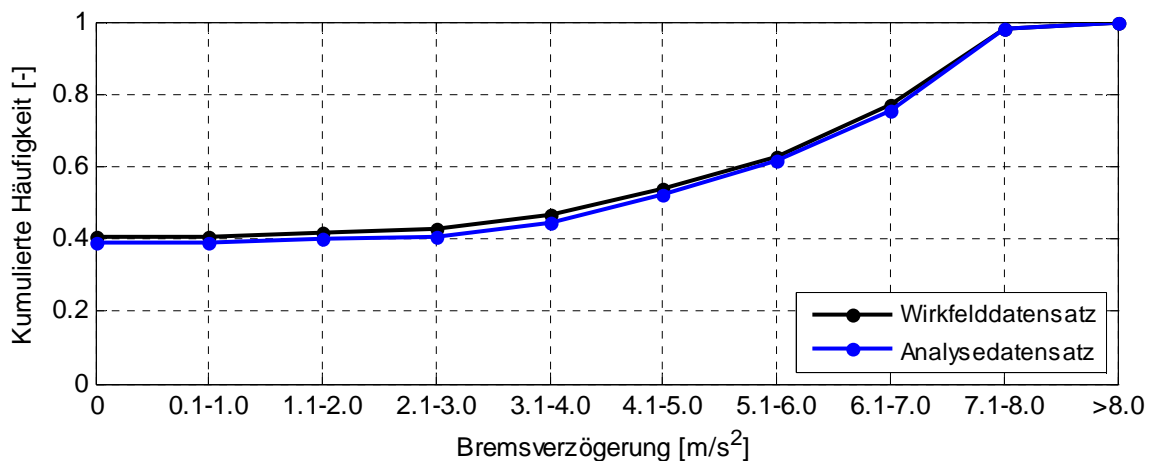


Abbildung 2-10: Kumulierte Häufigkeiten der rekonstruierten Bremsverzögerungen im Wirkfeld- und Analysedatensatz

Neben den technischen Kenngrößen enthalten In-Depth-Datenbanken auch Informationen zu den Fußgängererletzungen und deren zugrundeliegenden Mechanismen. Eine Betrachtung der Verletzungsschweren auf Basis des Fußgänger-Gesamtdatensatzes zeigt eine Verteilung analog Abbildung 2-11. Demnach verletzen sich 51% der Fußgänger leicht, 44% schwer und 5% tödlich. Wie in Kapitel 2.1.1 erwähnt, existieren in der Datenbank zwei

Varianten der Verletzungsschweredokumentation. Einen Vergleich zwischen amtlicher Verletzungsschweredokumentation und Abbreviated Injury Scale zeigt Abbildung 2-12. Dargestellt ist der Anteil an leichtverletzten (LV) und mindestens schwerverletzten (SV+) Fußgängern in den beiden Gruppen MAIS1 und MAIS2+, wozu alle Fußgänger mit Verletzungen von mindestens MAIS2 zählen. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch eine derartige Klassendefinition eine sehr gute Korrelation zwischen den beiden Dokumentationsvarianten erreicht wird und MAIS2+ verletzte Fußgänger in guter Näherung als mindestens schwerverletzte Personen nach amtlicher Definition zu interpretieren sind.

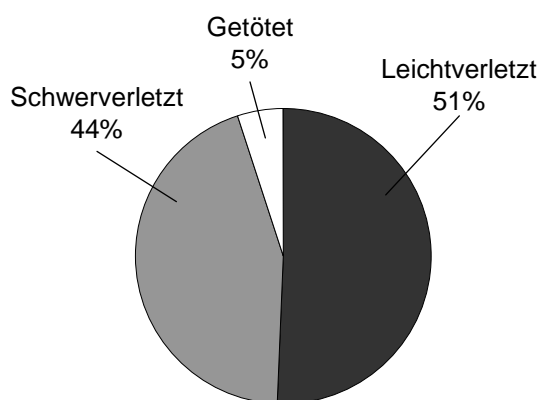


Abbildung 2-11: Amtliche Verletzungsschweren der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz

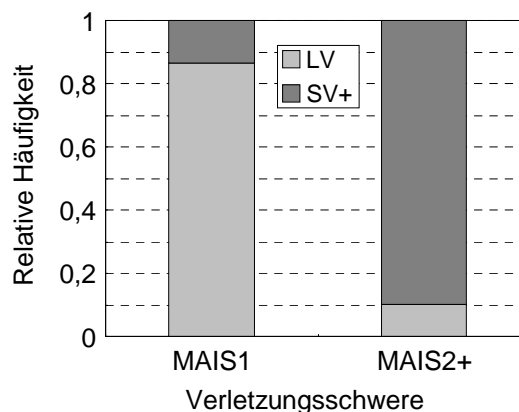


Abbildung 2-12: Amtliche und AIS-Verletzungsschweren im Analysedatensatz

Im Rahmen einer Einzelfallsichtung erfolgt über die vorhandenen Informationen der In-Depth-Datenbank hinaus eine Klassifizierung der Fußgängerunfälle hinsichtlich der Anprallart. Unterschieden werden dabei die Gruppen Teil-, Vollstöße und Andere. Der Kategorie Andere ist beispielsweise ein Überrollen des Fußgängers zugeordnet. Die Verteilung jeder Stoßkategorie auf die AIS-Verletzungsschweredokumentation ist in Abbildung 2-13 dargestellt. Generell zeigt sich, dass etwa 37% der Anpralle als Teilstöße und 57% als Vollstöße stattfinden. Weiter ergibt sich eine Aufteilung der Verletzungsschweren innerhalb der Teilstöße von etwa 57% MAIS1 und 43% MAIS2+. In der Gruppe der Vollstöße liegt der Anteil MAIS1 verletzter Fußgänger bei etwa 45% und der Anteil MAIS2+ Verletzter bei 55%. Dies ist plausibel, weil bei den Vollstößen mehr Kollisionsenergie auf den Fußgänger übertragen wird, woraus in der Regel eine höhere Verletzungsschwere resultiert.

Bei einer Kollision zwischen Fahrzeug und Fußgänger sind im Allgemeinen zwei zeitlich voneinander getrennte Phasen zu unterscheiden. Der sogenannte Primäranprall bezeichnet die Kollision des Fußgängers mit dem Fahrzeug. Dieser wird unter Umständen von einem Sekundäranprall gefolgt. Während des Sekundäranpralls treten Kollisionen des Fußgängers mit der Umgebung, beispielsweise der Straßenoberfläche, auf. Eine detailliertere Unter-

2. Datenbanken zum Fußgängerunfallgeschehen

gliederung und Beschreibung der unterschiedlichen Phasen ist [KÜHN 2007, S.74ff.] bzw. [BURG 2007, S.305ff.] zu entnehmen. In Abbildung 2-14 ist die Verteilung der AIS-Verletzungsschwere in Abhängigkeit eines Sekundärpralls aufgezeigt. Die Zuordnung eines Unfalls zur Gruppe Sekundärprall erfolgt, wenn der Fußgänger mindestens ein Trauma infolge des Sekundärpralls erleidet.

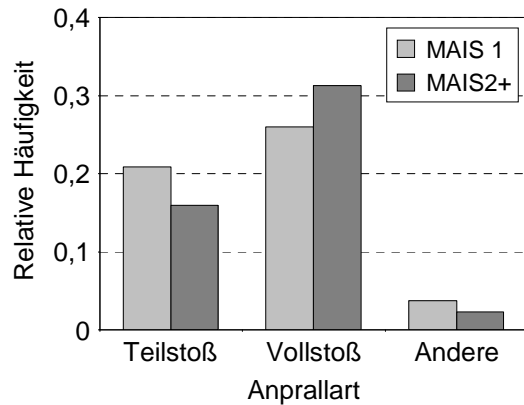


Abbildung 2-13: Verletzungsschweren der Fußgänger in Abhängigkeit der Stoßkategorie im Analysedatensatz

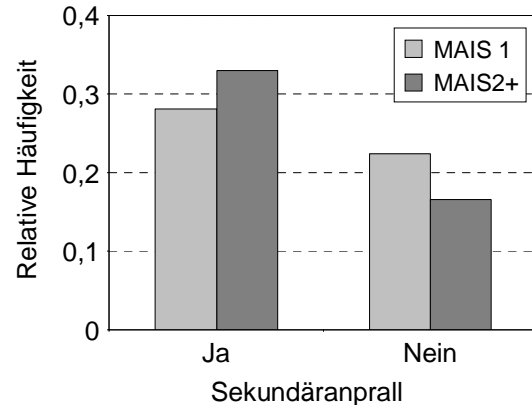


Abbildung 2-14: Verletzungsschweren der Fußgänger in Abhängigkeit des Sekundärpralls im Analysedatensatz

Die Analyseergebnisse zeigen, dass in etwa 60% der Unfälle Verletzungen aus dem Sekundärprall resultieren. Daraus ist nicht abzuleiten, dass die tendenziell höheren Verletzungen aus dem Sekundärprall stammen. Hierfür erfolgt eine weiterführende Untersuchung der Einzelunfälle mit einem Sekundärprall. Diese ergibt, dass in 31% die schwerste und in 43% eine gleichschwere AIS-Einzelverletzung, wie durch den Fahrzeugkontakt verursacht, aus dem Sekundärprall resultieren. In den verbleibenden 26% stammt die schwerste Verletzung rein aus dem Fahrzeuganprall. Folglich ist in etwa 20% der Fälle im Analysedatensatz die schwerste AIS-Verletzung durch einen Anprall mit der Umgebung entstanden.

3 Aktuelle Bewertungsmethoden von Sicherheitssystemen auf Basis von Realunfalldaten

Zur Überprüfung der Sicherheitsmaßnahmen von Fahrzeugen schreibt die Gesetzgebung für einzelne Komponenten oder für die Gesamtheit aller Sicherheitseinrichtungen Wirkvorschriften vor. Neben den gesetzlichen Anforderungen existieren in der Automobilindustrie firmenspezifische Prüfverfahren, die sich in den meisten Fällen umfangreicher darstellen als die gesetzlichen Testverfahren. Weiter finden auch Versuchsprogramme von staatlichen Institutionen, Verbraucherschutzorganisationen oder Versicherungsgesellschaften Berücksichtigung in der Fahrzeugauslegung [KRAMER 2009, S.283ff.]. Eine andere Variante zur Ermittlung des Sicherheitsgewinns besteht darin, Realunfalldaten als Bewertungsgrundlage heranzuziehen, welche über die Testvorschriften hinaus wichtige Erkenntnisse über die Wirkung von Sicherheitssystemen im Feld liefern. Zum einen werden damit bestehende Technologien, welche sich seit längerer Zeit im Feld befinden validiert und zum anderen kann das Potential künftiger Sicherheitsmaßnahmen prognostiziert werden. Diese beiden Ansätze werden als retrospektiv bzw. prospektiv bezeichnet. Bei der Bewertungsmethode PreEffect-iFGS handelt es sich um ein prospektives Verfahren nach dem Vorgehen einer Einzelfallanalyse. Aus diesem Grund erfolgt im weiteren Verlauf des Kapitels eine Darstellung veröffentlichter Bewertungsverfahren auf Basis von Realunfalldaten, welche ebenfalls auf diesem Ansatz basieren.

3.1 Retrospektive und prospektive Systembewertung

Zur Ermittlung des Sicherheitsgewinns eines Assistenz- oder Sicherheitssystems, unter Verwendung von Realunfalldaten, existieren die retrospektive und die prospektive Systembewertung. Der Einsatz des jeweiligen Verfahrens ist in einem gekoppelten Produktentwicklungs- und Systembewertungsprozess dargestellt (Abbildung 3-1). Dieser besteht aus der Planungsphase, in welcher neue Ideen oder Erkenntnisse aus Unfallanalysen die Basis zur Definition neuer Sicherheitsfunktionen bilden. Gefolgt wird diese vom Prozessschritt der Definition/Realisierung, welcher die Ausarbeitung zuvor definierter Konzepte beinhaltet. Danach schließt sich die Phase der Produktion und Markteinführung an [HEIBING 2009]. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt eine Verbreitung der Fahrzeuge mit dem Sicherheitssystem im Feld. Befindet sich eine ausreichend hohe Anzahl an Fahrzeugen über einem längeren Zeitraum im Markt, sind diese in einer statistisch repräsentativen Anzahl in den Unfalldatenbanken aufzufinden. Innerhalb dieser Prozessschritte erfolgt eine Eingliederung der beiden Bewertungsansätze analog Abbildung 3-1.

3. Aktuelle Bewertungsmethoden von Sicherheitssystemen auf Basis von Realunfalldaten

Das Verfahren der retrospektiven Systembewertung bestimmt den Sicherheitsgewinn eines Systems durch die Analyse von Unfalldatenbanken, indem die Daten in Gruppen aufgeteilt und unter bestimmten Gesichtspunkten statistisch analysiert werden. Durch die retrospektive Systembewertung können sowohl aktive als auch passive Sicherheitsmaßnahmen bewertet werden. Der Vorteil des retrospektiven Verfahrens besteht darin, dass eine Korrelation zwischen der Systemwirkungsweise und den resultierenden Verletzungen ohne Einbezug physikalischer oder theoretischer Insassenmodelle ermittelt wird [KRAMER 2009, S.303].

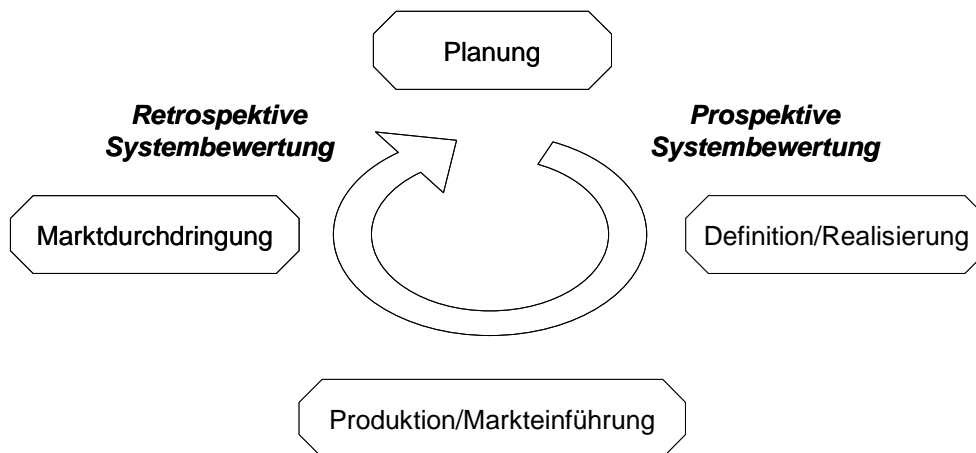


Abbildung 3-1: Gekoppelter Produktentwicklungs- und Systembewertungsprozess

Beispielsweise erfolgt für die Analyse des Sicherheitsgewinns einer optimierten passiven Fahrzeugstruktur eine Gruppierung von Kollisionen äquivalenter Unfallschwere nach dem Alter der Fahrzeuge. Die Reduktion des Verletzungsschweregrades in der Gruppe mit den jüngeren Fahrzeugen weist auf den ersten Blick den Nutzen der optimierten Fahrzeugstruktur aus. Der ermittelte Sicherheitsgewinn ist aber nicht allein auf die Fahrzeugstruktur zurückzuführen. Neuere Fahrzeuge sind oft mit weiteren passiven Sicherheitsmaßnahmen, wie beispielsweise Airbags, ausgestattet. Weiter wirkt sich auch das Alter oder die Sitzposition der verunfallten Insassen im Fahrzeug auf die Verletzungsschwere aus. Daraus wird deutlich, dass die Definition von Vergleichssatzen zur retrospektiven Systembewertung großen Einfluss auf die Analyseergebnisse hat. Das retrospektive Vorgehen zur Bestimmung des Unfallvermeidungspotentials eines aktiven Systems ist in [ZOBEL 2007] dargestellt.

Für eine Ermittlung des Sicherheitsgewinns von Maßnahmen, welche sich noch nicht im Feld befinden, ist der prospektive Bewertungsansatz heranzuziehen. Da es sich bei der Bewertungsmethode PreEffect-iFGS um ein derartiges Verfahren handelt, werden nachfolgend aktuelle prospektive Bewertungsmethoden vorgestellt, welche auf Realunfalldaten basieren und nach der Methode einer Einzelfallanalyse durchgeführt wurden.

3.2 Studie zum Sicherheitsgewinn eines Bremsassistenten in Fußgängerunfällen

Die ACEA Equal Effectiveness Study On Pedestrian Protection nach [HANNAWALD 2003] vergleicht das Potential zur Reduktion verletzter Fußgänger infolge zweier unterschiedlicher Maßnahmen. Zum einen erfolgt eine Ermittlung des Sicherheitsgewinns, welcher rein aus passiven Anforderungen zum Fußgängerschutz resultiert. Dieser wird mit der Reduktion verletzter Fußgänger infolge der Fahrzeugausstattung mit einem Bremsassistenten und gegenüber dem ersten Fall reduzierten passiven Anforderungen verglichen. Das Vorgehen der Studie wird als Einzelfallanalyse bezeichnet, da die Bestimmung des Sicherheitsgewinns unfallspezifisch erfolgt. Die Datenbasis bilden Realunfalldaten aus dem Projekt GIDAS und der Medizinischen Hochschule Hannover. Die Modellierung der passiven Anforderungen erfolgt durch eine Veränderung der Schwere von Einzelverletzungen jedes verunfallten Fußgängers in Abhängigkeit der Anprallregion am Fahrzeug. Zur Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeitsreduktion durch den Bremsassistenten werden die an der Kollision beteiligten Fahrzeuge virtuell mit diesem System ausgestattet, wobei eine simulative Nachbildung des Annäherungsverhaltens von Fahrzeug und Fußgänger nicht erfolgt.

3.2.1 Fußgängerunfalldatenbasis für die Untersuchungen

Datengrundlage für die Studie bilden Fußgängerunfälle aus dem Projekt GIDAS und der Medizinischen Hochschule Hannover, für welche die Fahrzeugkategorie, Anprallort, Pre-Crash-Parameter, MAIS, verletzungsverursachende Teile und der AIS-Wert aller Einzelverletzungen bekannt sind. Auf Grund dieser Anforderungen verbleibt ein Datensatz von 1.153 Fußgängerunfällen. Die Wirkungsweise sowohl aktiver als auch passiver Sicherheitssysteme wird nur für Kollisionen untersucht, in denen der Fußgänger einen Frontalanprall mit einem Pkw erlitten hat, so dass letztendlich 712 Unfälle für die Analysen herangezogen werden.

3.2.2 Modellierung passiver Testverfahren zum Fußgängerschutz

Die beiden passiven Anforderungen, für welche der Sicherheitsgewinn im Realunfallgeschehen quantifiziert wird, leiten sich aus zwei Testverfahren ab. Zum einen handelt es sich um die Prüfvorschrift 2003/102/EC Phase 1, welche im Jahr 2003 von der europäischen Gesetzgebung erlassen wurde (Abbildung 3-2). Zum anderen wird der damalige Vorschlag der Arbeitsgruppe EEVC WG 17 analysiert, welcher im Rahmen des Gesetzgebungsprozesses zur Fußgängerschutzphase 2 entstanden ist (Abbildung 3-3). Es ist darauf hinzuweisen, dass dieser nicht der endgültig verabschiedeten Fußgängerschutzphase 2 ent-

3. Aktuelle Bewertungsmethoden von Sicherheitssystemen auf Basis von Realunfalldaten

spricht. Die beiden Abbildungen machen deutlich, dass der Vorschlag nach EEVC WG 17 eine Erweiterung der passiven Testanforderungen beinhaltet.

Da in den verwendeten Unfalldaten keine Fahrzeuge vorhanden sind, welche die Testverfahren aus Abbildung 3-2 bzw. Abbildung 3-3 erfüllen, ist eine Ermittlung des entsprechenden Sicherheitsgewinns auf Basis der ursprünglichen GIDAS-Unfalldaten nicht durchführbar. Deshalb erfolgt eine Veränderung der Verletzungsschweren verunfallter Fußgänger unter der Annahme, dass die Fahrzeuge die Testvorschriften erfüllen. Das dabei angewandte Verfahren wird als Injury-Shift-Methode in Anlehnung an [BAMBERG 1994] bezeichnet. Daraus resultiert eine unfallspezifische Reduktion von AIS-Einzelverletzungen der Fußgänger, falls das Verletzungsverursachende Teil innerhalb des angenommenen Testbereichs liegt. Die Fahrzeugteile, welche als innerhalb der Prüfbereiche angenommen werden, unterscheiden sich für die beiden Testverfahren. Zur Modellierung des Sicherheitsgewinns der passiven Anforderungen nach dem Vorschlag der EEVC WG 17 (Abbildung 3-3) werden gegenüber den Testvorschriften nach Abbildung 3-2 mehr Fahrzeugteile als optimiert angenommen. Die genauen Bauteile zur Beschreibung der jeweiligen Prüfbereiche sind in [HANNAWALD 2003, S.33ff.] dargestellt.

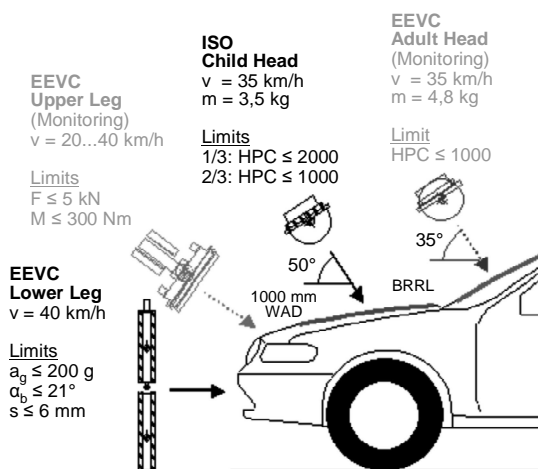


Abbildung 3-2: Testvorschriften
2003/102/EC Phase 1
[HANNAWALD 2003, S.7]

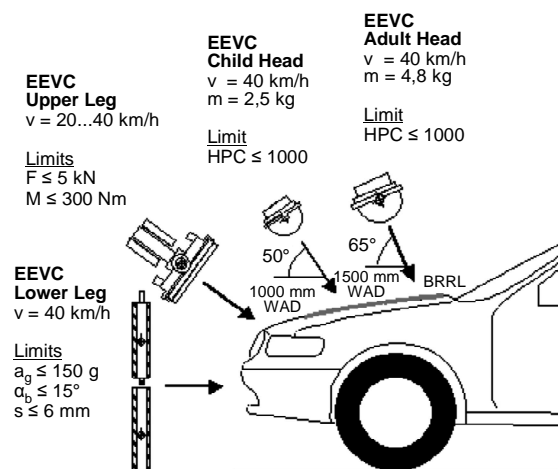


Abbildung 3-3: Testvorschriften des nicht umgesetzten Entwurfes der EEVC WG 17
[HANNAWALD 2003, S.7]

Das Vorgehen zur Verschiebung der Einzelverletzungen in Abhängigkeit von deren Entstehungsort ist für einen Unfall und für den angenommenen Prüfbereich der Testvorschriften nach dem Vorschlag der EEVC WG17 in Abbildung 3-4 aufgezeigt. Auf der linken Seite sind die ursprünglichen Einzelverletzungen des Fußgängers mit den verursachenden Fahrzeugteilen, wie diese der GIDAS-Datenbank zu entnehmen sind, dargestellt. Die Anwendung der Injury-Shift-Methode führt dazu, dass eine Reduktion der Einzelverletzungsschweren um einen AIS-Wert erfolgt, wenn diese von Fahrzeugteilen hervorgerufen werden, welche zum

angenommenen Prüfbereich zählen. Auf der rechten Seite von Abbildung 3-4 ist zu erkennen, dass dies für die Kopf-, Hüft- und Unterschenkelverletzung der Fall ist und dementsprechend die Reduktion um eine AIS-Verletzungsschwere erfolgt. Aus diesem Vorgehen resultiert entweder ein neuer verringerter oder unveränderter MAIS*-Wert (Abbildung 3-4). Analog stellt es sich zur Bestimmung des Sicherheitsgewinns des Testverfahrens nach Abbildung 3-2 dar, wobei hier ein kleinerer Testbereich unterstellt wird und dementsprechend weniger Verletzungen reduziert werden. Das Vorgehen der Injury-Shift-Methode erfolgt für alle 712 Fußgänger-Pkw-Kollisionen, woraus für jeden Unfall ein MAIS*-Wert resultiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass auch Verletzungen mit einem Schweregrad von AIS1 reduziert werden und diese Körperregionen im Falle einer Verletzungsschwerereduktion trotz einer Kollisionsgeschwindigkeit von ungleich Null folglich als unverletzt angenommen werden.

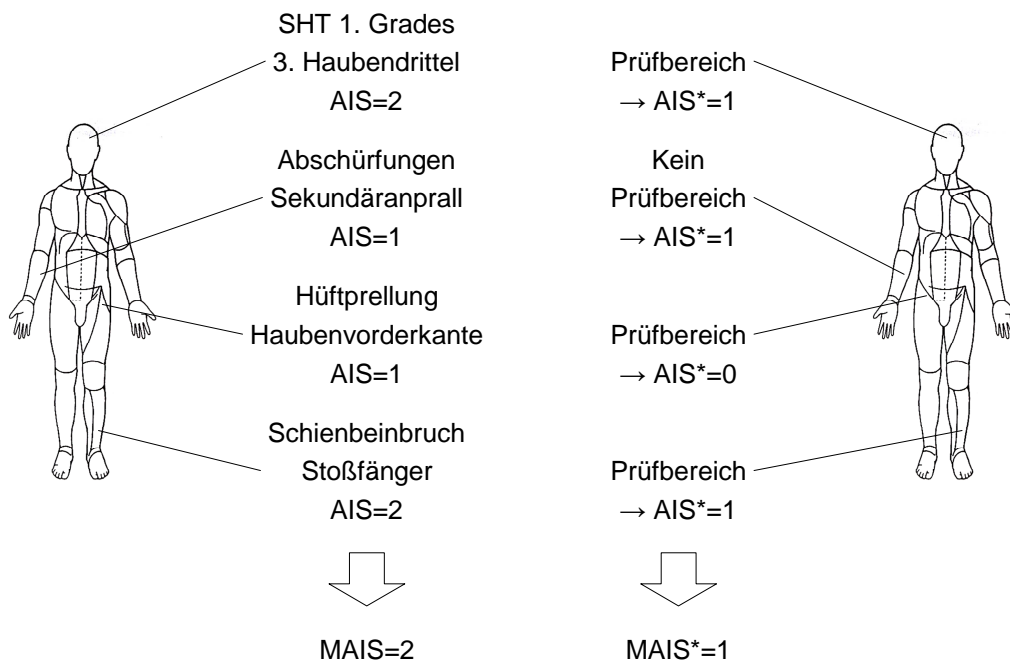


Abbildung 3-4: Injury-Shift-Methode zur Modellierung des nicht umgesetzten Testverfahrens nach Vorschlag EEVC WG17 in Anlehnung an [Hannawald 2003, S.37]

3.2.3 Modellierung des Bremsassistenten

Beim Bremsassistenten handelt es sich um ein System, welches den Vollbremswunsch des Fahrers erkennt und eine Notbremsung einleitet. Dessen Aktivierung erfolgt nach [HANNAWALD 2003, S. 41] im Realfahrzeug unter Berücksichtigung der durch den Fahrer aufgebrauchten Bremspedalgeschwindigkeit und des Bremsdrucks. Diese Informationen sind den verwendeten Realunfalldaten nicht zu entnehmen. Aus diesem Grund werden verschiedene Annahmen bezüglich einer Aktivierung des Bremsassistenten getroffen.

Es erfolgt ein Verweis auf Fahrversuche, welche zeigen, dass Testpersonen in Gefahrensituationen mit einer höheren Pedalgeschwindigkeit bremsen. Aus diesem Grund wird angenommen, dass das Auslösekriterium der Pedalgeschwindigkeit in allen gebremsten Unfällen der Datenbank überschritten wird. Zur Berücksichtigung der Bremsstärke wird die rekonstruierte mittlere Verzögerung einbezogen. Es erfolgt die Definition eines Grenzwertes von mindestens 6 m/s^2 als Auslöseschwelle zur Aktivierung des Bremsassistenten. Insgesamt besitzen 47% der 712 Fußgängerunfälle eine Bremsverzögerung von größer als 6 m/s^2 , so dass eine Aktivierung des Bremsassistenten in einer Größenordnung erfolgt, die auch in Fahrsimulatorstudien nachgewiesen wurde [HANNAWALD 2003, S. 41].

Vor einer Bestimmung der neuen Kollisionsgeschwindigkeit durch die Wirkung des Bremsassistenten erfolgt zunächst eine Neuberechnung der Ausgangsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Gleichungen für eine Bewegung mit konstanter Verzögerung nach Gl. 3-1 [HANNAWALD 2003, S. 42].

$$v_0 = \sqrt{v_{k,gidas}^2 + 2 \cdot a_{gidas} \cdot s_{gidas}} \quad \text{Gl. 3-1}$$

mit v_0 = Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug
 $v_{k,gidas}$ = Kollisionsgeschwindigkeit aus der GIDAS - Datenbank
 a_{gidas} = Mittlere Bremsverzögerung aus der GIDAS - Datenbank
 s_{gidas} = Bremsweg aus der GIDAS - Datenbank

Die Ausgangsgeschwindigkeit v_0 aus Gl. 3-1 findet Eingang in die Berechnung der neuen Kollisionsgeschwindigkeit bei einer angenommenen Aktivierung des Bremsassistenten. Für alle Unfälle, in denen mit einer Mindestverzögerung von 6 m/s^2 gebremst wird, erfolgt eine Neuberechnung der Kollisionsgeschwindigkeit nach Gl. 3-2.

$$v_{k,bas} = \sqrt{v_0^2 - 2 \cdot a_{max} \cdot s_{gidas}} \quad \text{Gl. 3-2}$$

mit $v_{k,bas}$ = Kollisionsgeschwindigkeit durch die Aktivierung
des Bremsassistenten
 v_0 = Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug
 a_{max} = Maximal übertragbare Verzögerung
 s_{gidas} = Bremsweg aus der GIDAS - Datenbank

Als Verzögerung wird in Gl. 3-2 nicht mehr die ursprüngliche, sondern eine in Abhängigkeit der Straßeneigenschaften maximal erreichbare herangezogen [HANNAWALD 2003, S. 42]. Für alle anderen Fälle bleibt die Kollisionsgeschwindigkeit unverändert. Da in dieser Studie keine simulative Nachbildung des Annäherungsverhaltens von Fahrzeug und Fußgänger erfolgt, werden Kollisionen nur dann verhindert, wenn durch eine erneute Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit nach Gl. 3-2 ein vollständiger Abbau der Ausgangsgeschwindigkeit erfolgt. Daher wird implizit unterstellt, dass der Fußgänger über den ganzen Zeitraum der Berechnung am ursprünglichen Kollisionspunkt steht.

3.2.4 Berechnung des Sicherheitsgewinns

Aus den veränderten Unfalldaten, welche sich infolge der Modellbildung durch die Injury-Shift-Methode ergeben (Kapitel 3.2.2), erfolgt die Erzeugung von Verletzungsrisikofunktionen. Durch diese wird das Risiko eine MAIS2+ bzw. MAIS5+ Verletzung in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit zu erleiden beschrieben. Als Form des Zusammenhangs wird ein logistischer Funktionsverlauf unterstellt. Die Parametrisierung der logistischen Funktion erfolgt durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate [HANNAWALD 2003, S.28]. Dabei handelt es sich nicht um das Verfahren der binär-logistischen Regressionsanalyse, wie in Kapitel 7.3 dargestellt, da nach diesem eine Bestimmung der Regressionskoeffizienten durch die Maximum Likelihood-Methode erfolgt. Aus diesem Grund können auch keine entsprechenden Kriterien zur Quantifizierung der Modellanpassung ausgewiesen werden. Ferner erfolgen keine anderen Untersuchungen, ob durch eine logistische Funktion die Datengrundlage mit ausreichend hoher Genauigkeit approximiert wird oder sich die Annahme des logistischen Verlaufes in den Unfalldaten auch empirisch widerspiegelt.

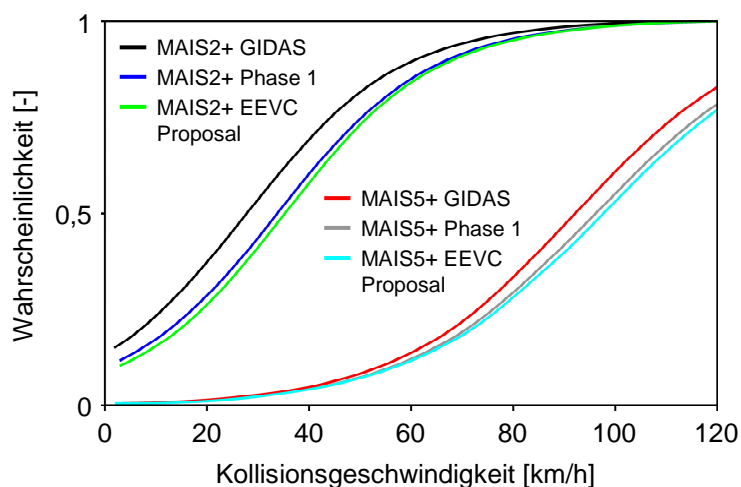


Abbildung 3-5: Verletzungsrisikofunktionen für die Eintrittswahrscheinlichkeiten einer MAIS2+ bzw. MAIS5+ Verletzung [HANNAWALD 2003, S.38]

Die erzeugten Verletzungsrisikofunktionen werden in den weiteren Analyseschritten für eine Berechnung der Wahrscheinlichkeit, eine Verletzungsschwere von MAIS2+ bzw. MAIS5+ zu erleiden herangezogen. Die Verletzungsrisikofunktionen auf Basis der ursprünglichen GIDAS-Daten und der Ergebnisse aus der Injury-Shift-Methode sind in Abbildung 3-5 dargestellt. Eine Auswertung der Risikofunktion für das Testverfahren nach 2003/102/EC Phase 1 mit den neu berechneten Kollisionsgeschwindigkeiten infolge einer Aktivierung des Bremsassistenten nach Gl. 3-2 ermöglicht eine kombinierte Bewertung aktiver und passiver Sicherheitssysteme. Aus den ermittelten Wahrscheinlichkeiten für eine MAIS2+ bzw. MAIS5+ Verletzung erfolgt über Differenzbildung eine Berechnung der Risiken für eine MAIS2-4 Verletzung. Durch ein Summieren der Wahrscheinlichkeiten über alle Unfälle wird die neue Anzahl MAIS2-4 bzw. MAIS5-6 verletzter Fußgänger berechnet. Die Ermittlung der entsprechenden Verletztenzahlen infolge der beiden passiven Testverfahren erfolgt durch ein Summieren der MAIS*-Werte als Ergebnis der Injury-Shift-Methode (Kapitel 3.2.2).

3.2.5 Bewertungsergebnisse

Die Bewertungsergebnisse werden in der Studie durch die Reduktion schwerverletzter und getöteter Fußgänger ausgewiesen, wobei zu berücksichtigen ist, dass es sich hierbei nicht um die amtlichen Verletzungsschwereklassen handelt. Die Definition schwerverletzt entspricht den MAIS-Werten Zwei bis Vier und getötet den Ausprägungen Fünf bis Sechs. Eine Berechnung der prozentualen Reduktion MAIS2-4 bzw. MAIS5-6 verletzter Fußgänger erfolgt bezogen auf alle MAIS2-4 bzw. MAIS5-6 Verletzten des Datensatzes. Darin sind folglich alle verletzten Fußgänger enthalten, auch aus nicht Fußgänger-Pkw-Kollisionen.

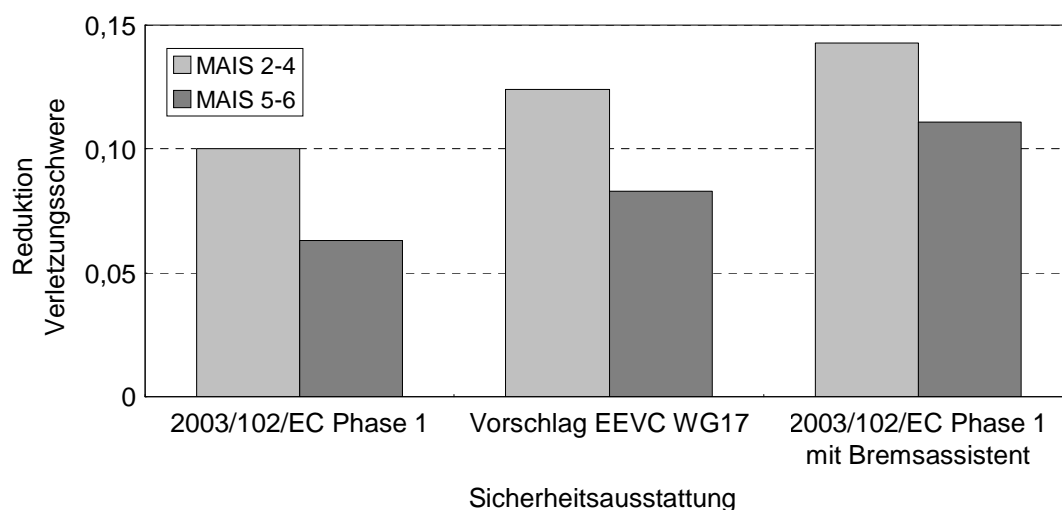


Abbildung 3-6: Bewertungsergebnisse für die Testverfahren 2003/102/EC Phase 1 bzw. Vorschlag EEVC WG 17 und 2003/102/EC Phase 1 mit Bremsassistent [HANNAWALD 2003, S.44f.]

Abbildung 3-6 zeigt, dass die Testanforderungen nach 2003/102/EC Phase 1 in Kombination mit einem Bremsassistenten gegenüber dem Vorschlag der EEVC WG 17 sowohl bei den Schwerverletzten als auch Getöteten ein höheres Schutzniveau besitzen. Zusätzlich ist Abbildung 3-6 zu entnehmen, dass bei einer reinen Bewertung der passiven Testverfahren der Vorschlag nach EEVC WG 17 ein besseres Ergebnis erzielt.

3.3 Bewertungsmethode zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme

In der Arbeit nach [BUSCH 2005] wird ein Verfahren zur Ermittlung des Sicherheitsgewinns eines Bremsassistenten und einer automatischen Notbremsfunktion vorgestellt. Es erfolgt eine Analyse zur Veränderung des Unfallgeschehens, wenn Fahrzeuge mit den beiden Systemen getrennt oder in Kombination ausgestattet werden. Das Vorgehen wird als automatisierte Einzelfallanalyse bezeichnet. Auf Basis von Realunfalldaten aus dem Projekt GIDAS erfolgt im ersten Schritt eine Nachbildung der ursprünglichen Unfallabläufe ohne Assistenzsystem. Im zweiten Schritt werden die Fahrzeuge mit einem sogenannten virtuellen Prototypen des zu bewertenden Assistenzsystems ausgestattet und der neue Verlauf der Kollisionen für jeden Einzelfall der Datenbasis berechnet. Durch einen Vergleich zwischen ursprünglicher und virtuell ermittelter Unfallsituation wird der resultierende Sicherheitsgewinn ermittelt. Ausgedrückt wird dieser sowohl durch physikalische als auch physiologische Parameter, welche auf die amtliche Verkehrsunfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland hochgerechnet werden.

3.3.1 Unfalldatenbasis für die Untersuchungen

Die Datenbasis für die Analysen bilden Unfalldaten des Projektes GIDAS, die sich aus den Beteiligten Pkw, Lkw, Bus, Kleinbus, motorisiertes Zweirad, Fahrrad und Fußgänger zusammensetzen. Vor Verwendung der Daten erfolgt eine Plausibilitätskontrolle. Diesbezüglich werden gültige Wertebereiche für ausgewählte Variablen der GIDAS-Datenbank und mittlere Ersatzgrößen, beispielsweise für Länge und Breite der Unfallbeteiligten, definiert [BUSCH 2005, S. 106ff.]. Als Konsequenz der Plausibilisierungsschritte verbleiben 4.579 Einzelunfälle als Datenbasis für die weiteren Analyseschritte.

3.3.2 Nachbildung realer Unfallabläufe

Im ersten Schritt werden mit Hilfe verfügbarer Parameter aus der GIDAS-Datenbank die realen Unfallabläufe durch eine Rückwärtsrechnung nachgebildet [BUSCH 2005, S. 41ff.]. Die Rekonstruktion der vorkollisionären Phase erfolgt dabei ausgehend von der Kollisionsstellung. Diese wird durch die Parameter Kollisionswinkel, Lage der Hauptbeschädigung, Berührungspunkte in Längs- bzw. Querrichtung und den geometrischen Abmessungen der Unfallbeteiligten definiert. Zur Berechnung der zeitlichen Aufenthaltsorte, ausgehend von der Endstellung, werden die in der GIDAS-Datenbank dokumentierten Pre-Crash-Parameter herangezogen. Falls eine Fahrzeugverzögerung der beteiligten Kollisionsobjekte vorliegt, wird diese als konstant angenommen und die Rückrechnung erfolgt zeititerativ unter Berücksichtigung der Gleichungen für eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung. Nach Überschreiten des Bremsbeginns, dessen Berechnung aus den Größen Ausgangs-, Kollisionsgeschwindigkeit und mittlerer Bremsverzögerung erfolgt, bestimmen sich die Aufenthaltsorte über die Gleichungen für eine unbeschleunigte Bewegung [BUSCH 2005, S.45]. Für eine Nachbildung der Kurvenunfälle werden der mittlere Kurvenradius und -winkel, welche ebenfalls den Unfalldaten zu entnehmen sind, verwendet (Abbildung 3-7).

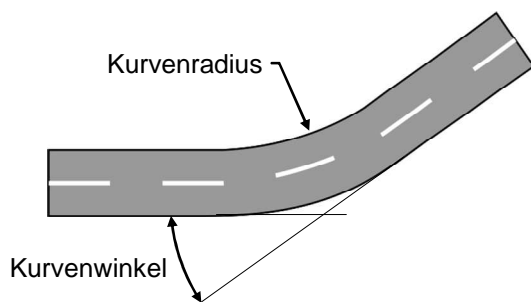


Abbildung 3-7: Beschreibung der Kurvengeometrie durch Kurvenradius und Kurvenwinkel [BUSCH 2005, S.46]

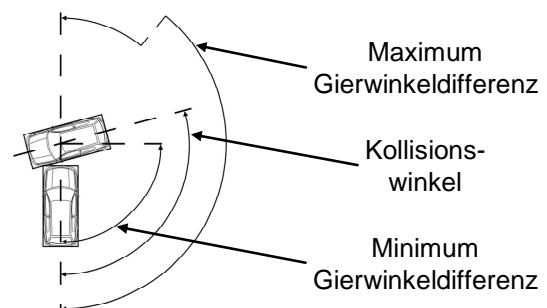


Abbildung 3-8: Minimum und Maximum der Gierwinkeldifferenz als Ersatzgröße des Kurvenwinkels [BUSCH 2005, S.47]

Durch Informationen über typische Querbeschleunigungswerte in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit von Normalfahrern erfolgt eine Substitution unbekannter Ausprägungen des Kurvenradius. Fehlende Werte des Kurvenwinkels werden über ein vom Kollisionswinkel abhängiges Minimum und Maximum der Gierwinkeldifferenz ersetzt (Abbildung 3-8). Dieses Vorgehen bildet nach [BUSCH 2005, S.47] Kreuzungs-, Ein- und Abbiegeunfälle in den meisten Fällen realistisch ab, da sich die Straßengeometrie hier als rechtwinklig darstellt. Bei anderen Unfallkonstellationen, wie beispielsweise Auffahr- und Gegenverkehrsunfällen wird mit diesem Vorgehen immer ein rechtwinkliger Kurvenverlauf modelliert.

3.3.3 Modellierung des Bremsassistenten

Auf Basis der im vorherigen Kapitel erzeugten Datengrundlage erfolgt zunächst eine Bewertung des Bremsassistenten. Das Ziel dieses Systems besteht darin, eine vom Fahrer gewünschte Notbremsung zu erkennen und die volle Bremskraft zu aktivieren. Die Auslöseentscheidung des Bremsassistenten im Fahrzeug wird nach [BUSCH 2005, S. 67] auf Basis von zwei Parametern getroffen. Diese stellen sich dar als Bremspedalgeschwindigkeit und Bremsdruck. Da diese Größen in der GIDAS-Datenbank nicht vorhanden sind, wird ein vereinfachtes Modell zur Detektion der Auslösung verwendet. Dieses beinhaltet die Annahme, dass eine ausreichend hohe Pedalgeschwindigkeit zur Auslösung des Bremsassistenten erreicht wird, wenn in der Datenbank eine Bremsreaktion des Fahrers auf ein Hindernis vor dem Fahrzeug angegeben ist. Diese Hypothese wird durch den Verweis auf Probandenstudien begründet. Zur Berücksichtigung des Bremsdrucks, als zweites Auslösekriterium, wird als Hilfsgröße die mittlere Bremsverzögerung herangezogen. Der erforderliche Mindestbremsdruck zur Aktivierung des Bremsassistenten wird durch die Definition einer Mindestverzögerung von 4 m/s^2 festgelegt. Dabei handelt es sich nach [BUSCH 2005, S. 71] um einen relativ hohen Wert, bei dem das System in der Realität mit Sicherheit ausgelöst hätte. Weiter erfolgt die Annahme einer Systemwirkung des Bremsassistenten nur für eine Teilmenge der 4.579 Einzelunfälle. Es werden nur Pkw und Kleinbusse mit dem System ausgestattet und die Wirkung auf deren erste Kollision begrenzt. Zudem erfolgt die Hypothese, dass eine Aktivierung nur in Unfällen erfolgt, welche frontal stattfinden, was sich aus den oben aufgeführten Erkenntnissen der Probandenuntersuchungen ableitet. Da durch den Bremsassistenten eine Vollbremsung eingeleitet wird, erfolgt eine Ermittlung der unfallindividuell maximal erreichbaren Verzögerungswerte aus Informationen zur Straßenoberfläche. Diese ist als textcodierte Angabe in der Datenbank vorhanden und wird durch mittlere Zahlenwerte aus der Literatur ersetzt [BUSCH 2005, S. 72].

Zur Modellierung des Bremsassistenten ist anzumerken, dass in allen Unfällen mit einer Fahrerbremsreaktion davon auszugehen ist, dass diese durch die erkannte drohende Kollision hervorgerufen und eine entsprechend hohe Bremspedalgeschwindigkeit erzielt wird. Diese These wird auch von [HANNAWALD 2003, S.41] in Kapitel 3.2.3 bestätigt. Ferner wird auf die Berechnungsart der neuen Kollisionsgeschwindigkeiten nicht eingegangen. Aufgrund des Vorgehens zur Nachbildung der ursprünglichen Unfallverläufe ist anzunehmen, dass dies unter Berücksichtigung der Gleichungen für eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung erfolgt und daher mit dem Vorgehen nach [HANNAWALD 2003, S. 42] in Kapitel 3.2.3 übereinstimmt.

3.3.4 Modellierung der automatischen Notbremsfunktion

Neben dem Bremsassistenten erfolgt die Bewertung einer automatischen Notbremsfunktion. Deren Systemaufbau setzt sich nach [BUSCH 2005, S. 77ff.] aus Sensorik, Auslösealgorithmus und Aktorik zusammen. Im Bewertungsverfahren besteht die Möglichkeit, das Fahrzeug mit zwei Sensoren auszustatten, welche bezüglich Reichweite und Öffnungswinkel parametrisierbar sind. Weiter werden andere Einflussgrößen berücksichtigt, beispielsweise ob die Abstände zwischen Eigenfahrzeug und Kollisionsgegner durch die Kontur bzw. Schwerpunktlage definiert oder stehende Hindernisse überhaupt erkannt werden.

Als Auslösestrategie des Funktionsalgorithmus wird ein wahrscheinlichkeitsbasiertes Modell in Anlehnung an [JANSSON 2002] herangezogen. Zugrunde liegt die Anforderung, dass es erst zu einer Aktivierung der Notbremsfunktion kommen darf, wenn die Unfallbeteiligten keine Möglichkeit mehr besitzen, die Kollision durch Lenk-, Beschleunigungs- und Bremsenriffe oder einer Kombinationen daraus zu vermeiden. Zur Bestimmung der zeitabhängigen Kollisionswahrscheinlichkeit werden für jeden der beiden Unfallbeteiligten sechs an die fahrphysikalischen Möglichkeiten grenzende Handlungsalternativen berücksichtigt. Diese stellen sich dar als Ausweichen nach links bzw. rechts, Beschleunigen, Verzögern und Verzögern mit gleichzeitigem Lenken nach links bzw. rechts. Eine Kombination dieser Alternativen für beide Fahrzeuge führt zu insgesamt 36 Möglichkeiten, für welche pro Zeitschritt analysiert wird, ob die Kollision durch einen Fahrereingriff noch vermeidbar ist. In Abbildung 3-9 ist eine Momentaufnahme eines exemplarischen Unfallverlaufs mit den sechs Handlungsalternativen und den entsprechenden Aufenthaltsorten dargestellt.

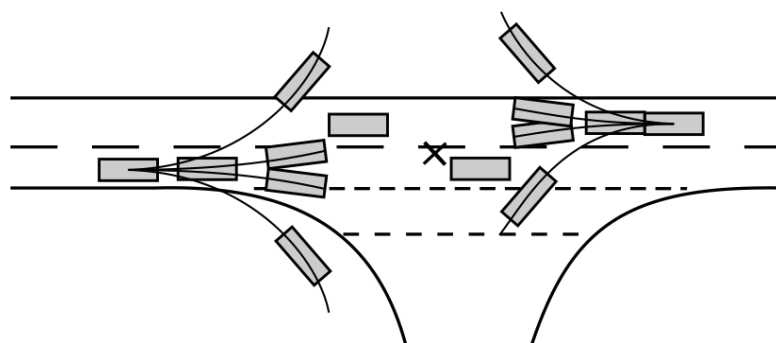


Abbildung 3-9: Momentaufnahme eines Abbiegeunfalls mit den sechs Handlungsalternativen je Beteiligten und prognostizierten Aufenthaltsorten nach 1,5 Sekunden [BUSCH 2005, S.90]

Für jede Kombination erfolgt eine Prüfung, ob diese innerhalb der nächsten zwei Sekunden zu einer Kollision führt. Durch dieses Vorgehen lässt sich in jedem Zeitinkrement die Kollisionswahrscheinlichkeit $p_{\text{kollision}}(t)$ aus der Anzahl an Handlungsalternativen $n_{\text{kollision}}(t)$, welche zu einer Kollision führen, nach Gl. 3-3 berechnen [BUSCH 2005, S.90].

$$p_{\text{kollision}}(t) = \frac{n_{\text{kollision}}(t)}{36}$$

Gl. 3-3

mit $p_{\text{kollision}}$ = Kollisionswahrscheinlichkeit
 $n_{\text{kollision}}$ = Anzahl der Kollisionen

Die Aktivierung einer Notbremsung erfolgt bei einer Wahrscheinlichkeit von Eins. Zur Berechnung der Ausweichtrajektorien mit Lenkreaktion wird das Simulationsprogramm CarSim verwendet. Darin werden Ausweichkurven für Geschwindigkeiten von 0 bis 240 km/h und für Reibwerte von 0,2 bis 1,0, auf Basis des Fahrzeugmodells eines VW Golf 4 VR6, in Schritten von 10 km/h simuliert. Die Ergebnisse für den zeitabhängigen longitudinalen bzw. lateralen Versatz und Gierwinkel des Fahrzeugs werden in Tabellen hinterlegt und für die tatsächlich benötigten Geschwindigkeiten linear interpoliert. Die Bestimmung der Aufenthaltsorte für die beiden Annahmen geradliniges Beschleunigen oder Verzögern erfolgt mit Hilfe der Gleichungen einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung [BUSCH 2005, S. 92].

Für eine Berechnung der Notbremsung in den Unfallsituationen wird ein Bremsverzug berücksichtigt, welcher sich aus Bremsansprechdauer und -schwelldauer zusammensetzt. Diese entfällt, wenn der Fahrer bei Systemaktivierung bereits eine Verzögerung eingeleitet hat. Auch für die automatische Notbremsfunktion wird nicht für alle der 4.579 Unfälle eine generelle Systemwirkung unterstellt. Die Einschränkungen folgen diesbezüglich den bereits in Kapitel 3.3.3 dargestellten Ausführungen. Für Unfälle mit Sichtbehinderung wird auf Grund pessimistischer Annahmen keine Aktivierung unterstellt.

Es ist festzustellen, dass dem Verfahren nach [BUSCH 2005] keine Fahrdynamiksimulation zugrunde liegt. Die erzeugten Fahrzeugaufenthaltsorte aus dem Programm CarSim werden analytisch und zeitdiskret aus Tabellen ausgelesen, interpoliert und in eine Programmierumgebung integriert. Für die Bestimmung der Aufenthaltsorte werden daher analytische Berechnungen mit interpolierten Simulationsergebnissen kombiniert. Weiter ist davon auszugehen, dass die Ausweichtrajektorien des VW Golf 4 VR6 für alle anderen Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger, Radfahrer oder Lkw, angenommen werden, die mitunter ein stark differierendes dynamisches Verhalten im Vergleich zum verwendeten Fahrzeugmodell des VW Golf 4 VR6 aufweisen. Weiter besteht in der Arbeit nach [BUSCH 2005] nur die Möglichkeit, den fest implementierten Auslösealgorithmus zur Bestimmung des Sicherheitsgewinns heranzuziehen. Analog Kapitel 3.3.3 wird weder für die Bewertung der automatischen Notbremsfunktion noch die Kombination mit dem Bremsassistenten das Vorgehen zur Berechnung der neuen Kollisionsgeschwindigkeiten erläutert.

3.3.5 Berechnung des physiologischen Sicherheitsgewinns

Durch die Wirkungsweise eines Bremsassistenten oder einer automatischen Notbremsfunktion ergeben sich Kollisionsgeschwindigkeiten, welche kleiner oder gleich der Kollisionsgeschwindigkeit des Originärunfalls sind. Aus diesem physikalischen Nutzen erfolgt eine Berechnung der Verletzungsschwerereduktion, welche in [BUSCH 2005, S. 55ff.] als physiologischer Sicherheitsgewinn bezeichnet wird. Für Kollisionen zwischen Fahrzeugen werden die fiktiven Kollisionsgeschwindigkeiten zunächst in stoßbedingte Geschwindigkeitsänderungen transformiert. Nur bei Fußgängerunfällen wird die Kollisionsgeschwindigkeit als Einflussgröße herangezogen. Das Vorgehen zur Ermittlung der fiktiven stoßbedingten Geschwindigkeitsänderung ist in [BUSCH 2005, S.52f.] beschrieben.

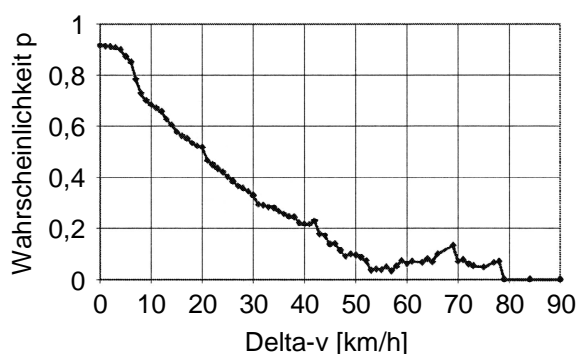


Abbildung 3-10: Wahrscheinlichkeitsfunktion unverletzter Pkw-Insassen für Frontalkollisionen [BUSCH 2005, S.56]

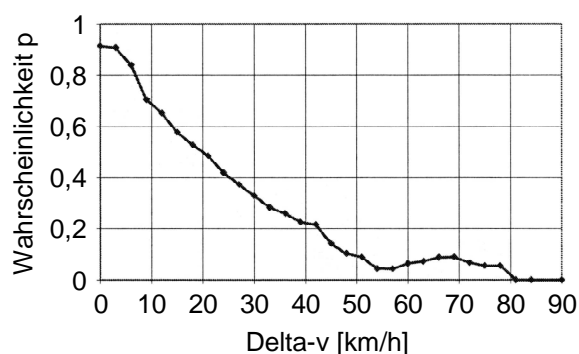


Abbildung 3-11: Geglättete Wahrscheinlichkeitsfunktion unverletzter Pkw-Insassen für Frontalkollisionen [BUSCH 2005, S.58]

Der generelle Ansatz zur Transformation der physikalischen Größen basiert auf einem Wahrscheinlichkeitsmodell. Für jede Beteiligengruppe werden eigene Funktionen zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit erzeugt, eine der vier amtlichen Verletzungsschweren zu erleiden. Ausnahme bilden die Lkw- und Bus- bzw. Pkw- und Kleinbusinsassen, welche zu je einer Gruppe zusammengefasst werden. Zur Bestimmung der Verletzungswahrscheinlichkeiten für Pkw- und Kleinbusinsassen erfolgt nur eine Berücksichtigung von gegurteten Personen aus Fahrzeugen mit einem Baujahr von 1992 oder jünger. Ab diesem Jahr ist nach [BUSCH 2005, S.55] ein deutlicher Sprung im Sicherheitsniveau der Fahrzeuge zu verzeichnen. Ferner wird in dieser Gruppe zwischen Front-, Seiten- und Heckkollisionen differenziert und im Fall einer Frontalkollision werden nur Fahrzeuge mit einer Airbagausstattung betrachtet.

Die Wahrscheinlichkeit bei einer Frontalkollision unverletzt zu bleiben bestimmt sich nach [BUSCH 2005, S.56] aus dem Verhältnis der Anzahl unverletzter Fahrzeuginsassen zur Anzahl der gesamten Fahrzeuginsassen innerhalb eines fließenden Geschwindigkeitsintervalls von ± 5 km/h. Den resultierenden Verlauf zeigt Abbildung 3-10. Dieses Vorgehen erfolgt ana-

log für die restlichen oben aufgeführten Beteiligengruppen und Verletzungsschweren. Um die Einflüsse statistischer Schwankungen zu kompensieren, werden die Wahrscheinlichkeitsfunktionen in den Folgeschritten geglättet und monotonisiert.

Die Glättung erfolgt durch eine Vergrößerung der Abstände der Stützstellen, die sich als Vielfache von 3 km/h darstellen, wobei die Werte des neuen Verlaufs aus einem gewichteten Mittel der umliegenden Datenpunkte der ursprünglichen Funktion berechnet werden [BUSCH 2005, S.57]. Zwischen den daraus bestimmten Werten erfolgt eine lineare Interpolation (Abbildung 3-11). Im letzten Schritt werden die Funktionsverläufe monotonisiert. Dies erfolgt durch die Bestimmung einer Horizontalen, welche die summierte Kurvenfläche darüber und darunter zu Null werden lässt (Abbildung 3-12). Ab einer Geschwindigkeit von 80 km/h wird die Annahme getroffen, dass sich die Verletzungswahrscheinlichkeiten nicht mehr verändern, da für höhere Werte die Fallzahlen zu gering sind, um eine Prognose abzugeben [BUSCH 2005, S.59]. Das Resultat der geglätteten und monotonisierten Funktion als Pkw-Insasse unverletzt zu bleiben zeigt Abbildung 3-13. Darüber hinaus sind darin auch die Wahrscheinlichkeiten für die drei weiteren amtlichen Verletzungsschweregrade dargestellt.

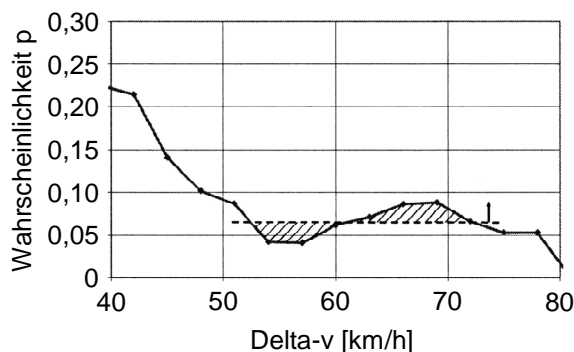


Abbildung 3-12: Vorgehen zur Bestimmung einer Horizontalen für die Monotonisierung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen [BUSCH 2005, S.59]

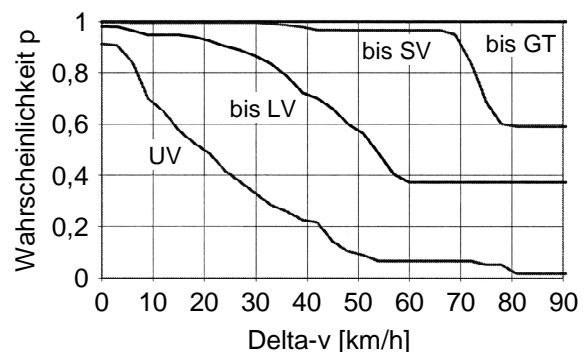


Abbildung 3-13: Geglättete und monotonisierte Wahrscheinlichkeitsfunktionen für Pkw-Insassen in Frontalkollisionen [BUSCH 2005, S.60]

Zur Bestimmung des physiologischen Sicherheitsgewinns wird für jede Person die Differenz zwischen ursprünglicher und fiktiver Verletzungswahrscheinlichkeit gebildet, über alle Einzelfälle aufsummiert und daraus die gesamte Reduktion an Verletzten berechnet. Auf Grund einer leichten Verzerrung der GIDAS-Unfalldaten, gegenüber der Verkehrsunfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland, in Richtung schwere Verletzungen erfolgt eine Hochrechnung des Sicherheitsgewinns auf die amtliche Erhebung [BUSCH 2005, S.61ff.]. Hierfür werden Hochrechnungsfaktoren bestimmt, welche sich aus dem Quotienten der Anzahl verletzter Verkehrsteilnehmer auf Bundesebene und verletzter Verkehrsteilnehmer in den GIDAS-Daten, je Verletzungsschweregrad und Art der Verkehrsbeteiligung, berechnen. Für die

Prognose des Sicherheitsgewinns auf Bundesebene erfolgt die Annahme, dass lediglich eine Verbesserung um eine Verletzungsschwereklasse erfolgt. Eine Reduktion getöteter Personen führt daher nur zu einer Erhöhung der Schwerverletzten. Für eine genauere Beschreibung zum Verfahren der Hochrechnung wird auf [BUSCH 2005, S. 61ff.] verwiesen.

Im Rahmen des Vorgehens zur Erzeugung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen erfolgen in der Arbeit nach [BUSCH 2005] keine Aussagen zur Güte der Annäherung an die zugrundeliegenden Unfalldaten. Weiter wird die mehrmalige Veränderung des ursprünglichen Wahrscheinlichkeitsverlaufs durch Glättungs- und Monotonisierungsprozesse nicht analysiert oder quantifiziert.

3.3.6 Bewertungsergebnisse

Die Anwendung des zuvor geschilderten Verfahrens erfolgt durch eine Bewertung der beiden Systeme Bremsassistent und automatische Notbremsfunktion. Den Sicherheitsgewinn für den Bremsassistenten allein und in Kombination mit verschiedenen Konfigurationen der automatischen Notbremsfunktion (Abbildung 3-14) zeigt Abbildung 3-15. Daraus ist ersichtlich, dass durch den Bremsassistenten eine Reduktion der getöteten Verkehrsteilnehmer um 3% erfolgt. Ferner ist [BUSCH 2005, S.76] zu entnehmen, dass sich eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit vor allem bei den getöteten Fußgängern und Fahrradfahrern überdurchschnittlich hoch auswirkt.

| | K1 | K2 | K3 | K4 |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Sensorgeometrie | 120 m, 16° 40 m, 90° | 120 m, 16° 40 m, 90° | 120 m, 16° 40 m, 90° | 120 m, 16° 40 m, 90° |
| Konturerkennung | nein | ja | ja | ja |
| Reaktion auf stehendes Hindernis | nein | ja | ja | ja |
| Rechenzyklus | 100 ms | 100 ms | 50 ms | 50 ms |
| Akquisitionszeit | 1000 ms | 1000 ms | 500 ms | 500 ms |
| Objektklassifikation | nein | nein | nein | ja |
| Reibwerterkennung | nein | nein | nein | ja |

Abbildung 3-14: Verschiedene Konfigurationen der automatischen Notbremsfunktion [BUSCH 2005, S. 101]

Für diese ungeschützten Verkehrsteilnehmer ergeben sich Reduktionen durch den Bremsassistenten von 7,0% bzw. 12,6%. Daraus wird deutlich, ähnlich wie es die Bewertungsergebnisse nach [HANNAWALD 2003, S. 44f.] in Kapitel 3.2.5 zeigen, dass sich die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit sehr stark auf die Verletzungsschwerereduktion bei Fußgänger-kollisionen auswirkt. Eine zusätzliche Ausstattung der Fahrzeuge mit einer automatischen Notbremsfunktion macht deutlich, dass der Sicherheitsgewinn in Abhängigkeit der Systemkonfiguration deutlich gesteigert werden kann (Abbildung 3-15).

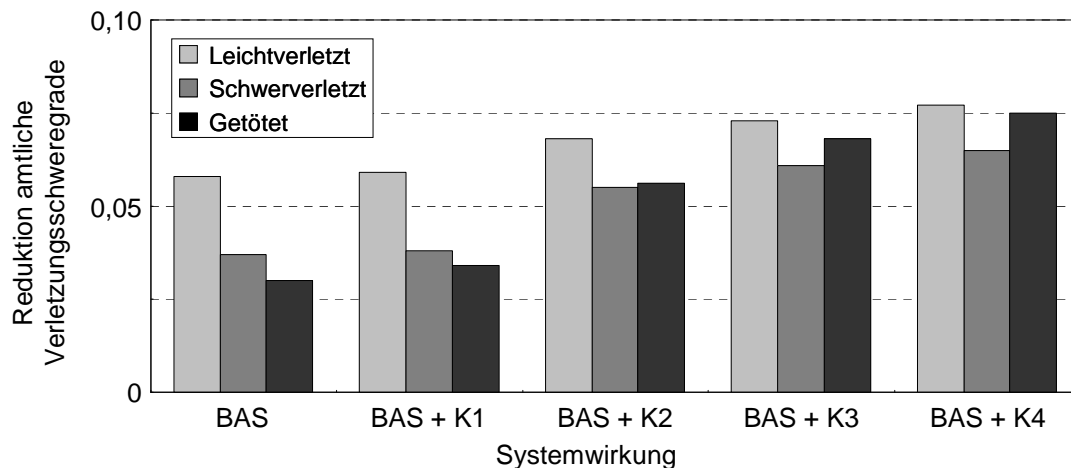


Abbildung 3-15: Sicherheitsgewinn durch den Einsatz eines Bremsassistenten und in Kombination mit verschiedenen automatischen Notbremsfunktionen [BUSCH 2005, S. 102]

3.4 Bewertung des EuroNCAP-Fußgängerschutztestverfahrens im Realunfallgeschehen

In der Studie nach [LIERS 2009] erfolgt eine Analyse des Sicherheitsgewinns der EuroNCAP-Fußgängerschutzbewertung [EURONCAP 2009] bezüglich dessen Relevanz für das reale Unfallgeschehen. Hierfür werden im ersten Schritt die realen Fußgängeranprallstellen an den Fahrzeugen den entsprechenden EuroNCAP-Prüffeldern zugeordnet. Diese Vorarbeiten ermöglichen es, in den folgenden Analysen den Nutzen verschiedener EuroNCAP-Testergebnisse im Realunfallgeschehen zu bestimmen. Die Bewertung erfolgt durch eine gezielte Veränderung der Schwere von Einzelverletzungen jedes angestoßenen Fußgängers in Abhängigkeit der Anprallpunkte am Fahrzeug und der Testergebnisse des korrespondierenden EuroNCAP-Prüffeldes. Auch diese Studie wird nach der Methode einer Einzelfallanalyse durchgeführt und basiert auf dem prinzipiellen Vorgehen nach [HANNAWALD 2003], welches in Kapitel 3.2 beschrieben wird. Die herangezogenen Realunfalldaten stammen ebenfalls aus der Datenbank des Projektes GIDAS.

3.4.1 Fußgängerunfalldatenbasis für die Untersuchungen

Insgesamt besteht die Datenbasis der Studie aus 1.821 rekonstruierten Fußgängerunfällen. Weitere Einschränkungen zur Vorbereitung der Daten für die Analysen erfolgen dadurch, dass als Kollisionsgegner des Fußgängers nur Fahrzeuge der Klasse M1 mit einem Frontalanprall betrachtet werden. Durch den Ausschluss untypischer Fußgängerunfälle, wie Überrollen oder Kollisionen, in welchen der Fußgänger zwischen zwei Fahrzeugen eingeklemmt wird, reduziert sich die Zahl adressierbarer Fälle auf 856. Im nächsten Schritt erfolgt eine Aufteilung der Einzelunfälle in Gruppen unter und über 40 km/h Kollisionsgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsgrenze leitet sich aus der Prüfgeschwindigkeit der Impaktoren im EuroNCAP-Testverfahren [EURONCAP 2009] ab, welche ebenfalls 40 km/h beträgt. Der finale Masterdatensatz besteht aus 667 Einzelunfällen, in denen der Fußgänger einen Frontalanprall mit einem Fahrzeug der Klasse M1 bis zu einer Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h erlitten hat [LIERS 2009, S. 2].

3.4.2 Ermittlung der EuroNCAP-Prüffelder für die Unfallfahrzeuge

Der EuroNCAP-Prüfbereich, innerhalb welchem der fahrzeugseitige Fußgängerschutz bewertet wird, setzt sich aus 60 einzelnen Feldern, 24 für den Kinderkopf, 24 für den Erwachsenenkopf und je sechs für Hüfte und Bein zusammen. Deren Ermittlung am Realfahrzeug wird durch das EuroNCAP-Pedestrian-Testing-Protocol [EURONCAP 2009] vorgeschrieben. Ganz allgemein erfolgt eine Definition der Prüffelder über verschiedene Abwickellängen (Wrap Around Distances) und Begrenzungslinien (Reference Lines), welche sich aus der Fahrzeuggeometrie des Vorderwagens ableiten.

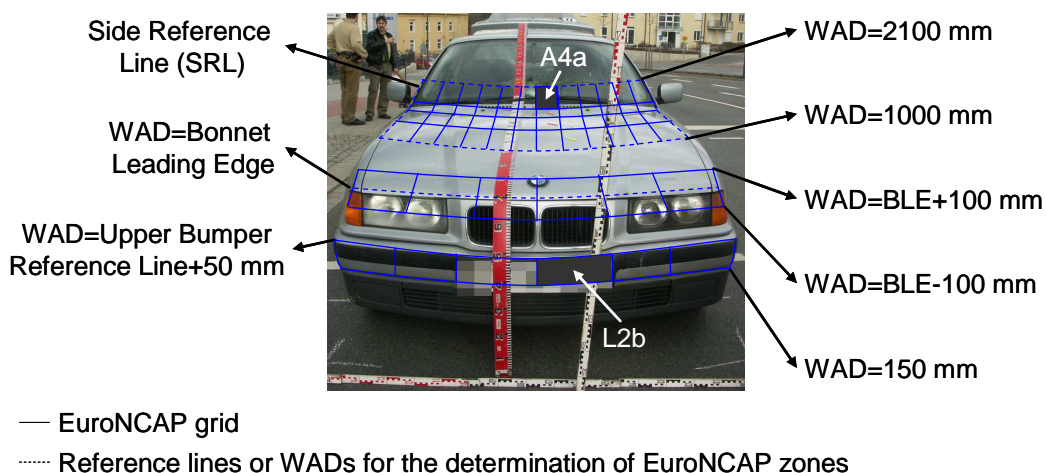


Abbildung 3-16: Abwickellängen und Begrenzungslinien zur Ermittlung der 60 EuroNCAP-Prüffelder [LIERS 2009, S. 4]

Für detailliertere Erläuterungen der Prüffeldbestimmung am Realfahrzeug wird auf [EURONCAP 2009] verwiesen. Für die unfallbeteiligten Fahrzeugmodelle erfolgt eine individuelle Bestimmung der oben aufgeführten Testfelder über CAD Modelle in Anlehnung an das EuroNCAP-Pedestrian-Testing-Protocol. Die entsprechenden Werte für Abwickellängen, Begrenzungslinien und das Resultat dieses Vorgehens zeigt Abbildung 3-16.

3.4.3 Zuordnung von Einzelverletzungen zu den EuroNCAP-Prüffeldern

Der nächste Schritt besteht darin, die Informationen über die Anprallstellen und daraus resultierender Verletzungen des Fußgängers zusammenzuführen. Hierfür erfolgt eine Vermessung aller Anprallpunkte an den beteiligten Fahrzeugen, so dass diese über Abwickellänge (WAD) und lateralem Abstand (y_r) von der Fahrzeuglängsachse eindeutig beschrieben sind (Abbildung 3-17). Unter Berücksichtigung detaillierter Informationen aus der GIDAS-Datenbank zu den Verletzungen des Fußgängers, wie Verletzungsbeschreibung, Verletzungsart, Numerical Injury Identifier der AIS und verletzungsverursachende Fahrzeugteile, erfolgt eine Kombination von Einzelverletzungen und korrespondierenden Anprallstellen.

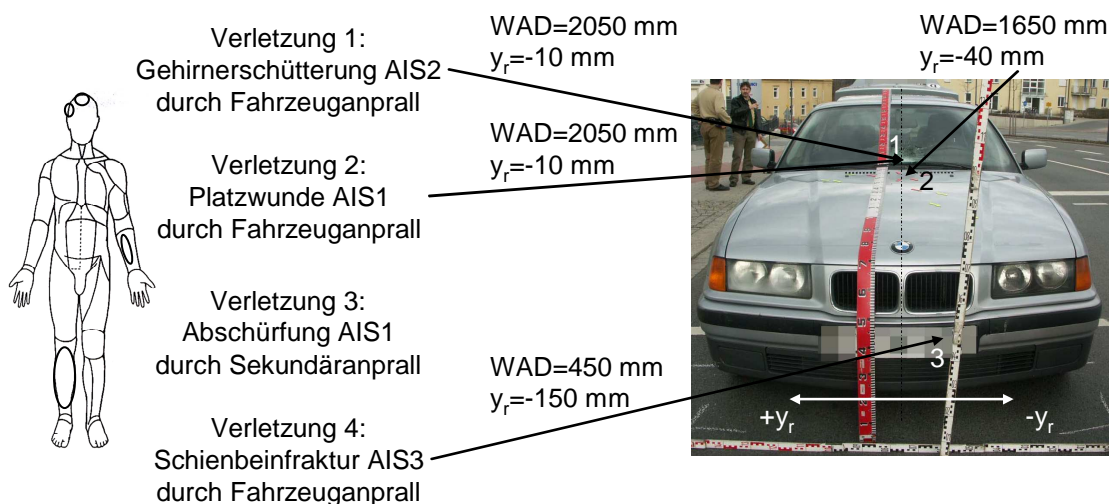


Abbildung 3-17: Anprallstellen und korrespondierende Einzelverletzungen für einen Beispielunfall in Anlehnung an [LIERS 2009, S. 5]

Das Ergebnis dieses Prozesses ist für den verunfallten Fußgänger am Fahrzeug aus Abbildung 3-16 in Abbildung 3-17 dargestellt. Dieser ist zu entnehmen, dass die beiden Kopfverletzungen aus dem Anprallpunkt 1 resultieren. Die dritte Verletzung am Arm stammt aus dem Sekundäranprall mit der Straßenoberfläche und die vierte wird dem Stoßfänger mit Anprallpunkt 3 zugeordnet. Ferner macht Abbildung 3-17 deutlich, dass ein Kontakt des Fußgängers mit dem Fahrzeug nicht zwangsläufig zu einer Verletzung führt. Der Anprallpunkt 2 resultiert aus dem Schulteranprall auf der Haube, wobei der Fußgänger in dieser

Region keine Verletzung erlitten hat [LIERS 2009, S. 5]. Die Kenntnis über Abwickellänge bzw. y_F -Abstand jeder Anprallstelle und korrespondierender Einzelverletzung ermöglicht eine Zuordnung der Einzelverletzungen zu den fahrzeugindividuellen EuroNCAP-Prüffeldern. Diese sind nach Abbildung 3-16 auch über Abwickellänge und lateralem Abstand definiert.

Für die Analysen erfahren nur schwere Einzelverletzungen mit Werten von mindestens AIS2 Berücksichtigung, so dass der Fußgänger im Beispiel nach Abbildung 3-17 zwei schwere Verletzungen erlitten hat. Unter Berücksichtigung der zuvor geschilderten Prozessschritte werden die beiden AIS2+ Verletzungen zwei EuroNCAP-Prüffeldern zugeordnet, welche in Abbildung 3-16 dargestellt sind und die Bezeichnung A4a bzw. L2b besitzen. Dieses Vorgehen erfolgt für alle 667 Unfälle des Masterdatensatzes, so dass insgesamt 519 AIS2+ Verletzungen einem EuroNCAP-Prüffeld, einem Fahrzeugbereich außerhalb der Prüfzonen oder dem Sekundärprall zugeordnet werden.

3.4.4 Modellierung der Verletzungsschwerereduktion in Abhängigkeit von EuroNCAP-Testergebnissen

Die Bewertung des fahrzeugseitigen Fußgängerschutzes erfolgt im EuroNCAP-Testverfahren durch einen Beschuss der ermittelten Prüffelder mit Impaktoren und Auswertung nach biomechanischen Kennwerten, wie dem Head-Injury-Criterion (HIC). Die Prüffelder werden in Abhängigkeit der ermittelten Kenngrößen bewertet. Grün bedeutet einen guten, gelb einen ausreichenden und rot einen marginalen Schutz des Fußgängers infolge eines Anpralls im entsprechenden Prüffeld. Um das im Test ermittelte Schutzniveau mit den Realunfalldaten in Verbindung zu setzen, erfolgt eine Reduktion der Einzelverletzungsschwere des Fußgängers in einem Prüffeld in Abhängigkeit der Farbgebung. Hierfür wird, wie in [HANNAWALD 2003] bzw. Kapitel 3.2.2, die Injury-Shift-Methode angewendet.

| Optimistischer Ansatz (Alle Einzelverletzungen) | Prüffeldfarbe | Pessimistischer Ansatz (Adressierte Einzelverletzungen) |
|--|---------------|--|
| Auf AIS 1 | Grün | Um zwei AIS-Werte (Maximal AIS 1) |
| Um zwei AIS-Werte (Maximal AIS 1) | Gelb | Um einen AIS-Wert (Maximal AIS 1) |
| Keine | Rot | Keine |

Abbildung 3-18: Annahmen zur Höhe des Injury-Shift von Einzelverletzungen für den optimistischen und pessimistischen Bewertungsansatz [LIERS 2009, S. 6]

Die Vorgaben zur Höhe einer Verletzungsschwererereduktion folgen zwei Ansätzen, welche als optimistisch und pessimistisch bezeichnet werden (Abbildung 3-18). Im optimistischen Ansatz wird die Annahme getroffen, dass alle Verletzungen durch eine optimierte passive Auslegung in den Testzonen positiv beeinflusst werden. Im pessimistischen Ansatz erfolgt die Annahme, dass durch eine verbesserte passive Auslegung nur diejenigen Verletzungen eine positive Wirkung erfahren, welche auch tatsächlich vom EuroNCAP in den entsprechenden Testzonen adressiert werden. Verletzungen an Armen oder Thorax, welche beispielsweise in den Kopfprüffeldern entstanden sind, werden folglich nur im optimistischen Ansatz, analog den Annahmen aus Abbildung 3-18, reduziert. Im pessimistischen Ansatz erfahren diese keine Berücksichtigung. Abbildung 3-18 macht deutlich, dass nur grüne oder gelbe Testergebnisse zu einer Reduktion der Verletzungsschwere führen, wobei Einzelverletzungen in grünen Feldern eine stärkere Minderung erfahren als in gelben Prüffeldern. Ferner erfolgt maximal eine Reduktion auf den Verletzungsschweregrad AIS1, so dass als Konsequenz eine Vermeidung von Verletzungen, im Gegensatz zur Studie nach [HANNAWALD 2003], ausgeschlossen ist. Die Verteilungen der AIS2+ Einzelverletzungen auf die 60 Prüffelder für die beiden Ansätze sind [LIERS 2009, S. 8] zu entnehmen.

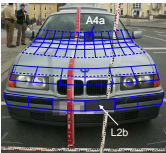
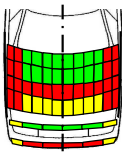
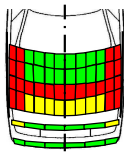
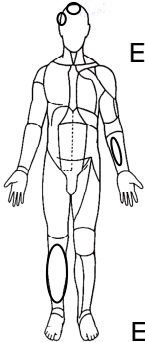
| Injury-Shift-Methode Pessimistischer Ansatz |  |  |  |
|--|---|--|---|
| | GIDAS | Verteilung 1 | Verteilung 2 |
|  Verletzung 1 EuroNCAP-Zone A4a Verletzung 2 AIS1 Verletzung 3 Sekundäranprall Verletzung 4 EuroNCAP-Zone L2b | AIS2 | A4a = grün AIS2 → AIS1 | A4a = grün AIS2 → AIS1 |
| | AIS1 | bereits AIS1 keine Reduktion | bereits AIS1 keine Reduktion |
| | AIS1 | Sekundäranprall keine Reduktion | Sekundäranprall keine Reduktion |
| | AIS3 | L2b = rot keine Reduktion | L2b = grün AIS3 → AIS1 |
| | MAIS3 | MAIS3 | MAIS1 |

Abbildung 3-19: Anwendung der Injury-Shift-Methode für den pessimistischen Bewertungsansatz [LIERS 2009, S. 7]

Eine Anwendung der Injury-Shift-Methode für den pessimistischen Ansatz ist in Abbildung 3-19 dargestellt. Abbildung 3-19 zeigt, dass der Fußgänger in der ursprünglichen Kollision zwei AIS2+ Verletzungen und einen Gesamtverletzungsschweregrad von MAIS3 erleidet. Unter der Annahme, dass das beteiligte Fahrzeug eines der beiden EuroNCAP-Testergebnisse aus Abbildung 3-19 erzielt hat, ergeben sich Veränderungen in den Ver-

letzungsschweren. Die beiden AIS2+ Verletzungen in den Testfeldern A4a und L2b sind in der Verteilung 1 grün bzw. rot angenommen, so dass sich, unter Berücksichtigung der Annahmen aus Abbildung 3-18, für die Kopfverletzung eine Reduktion um zwei AIS-Werte und für die Beinverletzung keine Veränderung ergibt. Unter Beachtung, dass die Einzelverletzungsschwere maximal auf AIS1 reduziert wird, resultiert ein neuer AIS-Wert für Verletzung 1 und eine unveränderte Gesamtverletzungsschwere von MAIS3. Für die Verteilung 2 wird das Prüffeld L2b, in welchem die Beinverletzung entstanden ist, als grün angenommen, so dass auch für diese Verletzung eine Reduktion um zwei AIS-Werte erfolgt und in diesem Fall eine neue Gesamtverletzungsschwere von MAIS1 resultiert.

Die Anwendung der Injury-Shift-Methode nach [LIERS 2009] basiert auf mehreren Annahmen. Zum einen wird davon ausgegangen, dass alle beteiligten Fahrzeuge der Datenbasis ausschließlich rote Testfelder besitzen, was null EuroNCAP-Bewertungspunkten entspricht. Da es sich bei den Fahrzeugen um ältere Modelle handelt, wird diese Annahme als angemessen erachtet. Vor allem im Bereich der Windschutzscheibe und Teilen der Motorhaube ist aber auch bei älteren Fahrzeugen ein besseres Bewertungsergebnis zu erwarten, so dass diese Annahme zu einer tendenziellen Überschätzung des Sicherheitsgewinns führt [LIERS 2009, S. 7]. Das tatsächliche Abschneiden im EuroNCAP-Testverfahren ist für den Großteil der Fahrzeuge im Datensatz nicht bekannt. Insgesamt verfügen zehn Fahrzeuge aus den 667 adressierbaren Unfällen über ein EuroNCAP-Testergebnis. In diesen Fällen resultiert eine AIS2 Verletzung aus einem grün getesteten Prüffeld, so dass eine Reduktion der Einzelverletzungsschwere auf einen AIS-Wert von Eins im optimistischen Bewertungsansatz zu einer tendenziellen Überschätzung des Sicherheitsgewinns führt. Weiter erfährt die Höhe der ursprünglichen AIS-Verletzungsschwere keine Berücksichtigung. Ein grünes Testfeld führt im optimistischen Ansatz sowohl für eine AIS2 als auch eine AIS5 Einzelverletzung zu einer Reduktion auf einen AIS-Wert von Eins.

3.4.5 Bewertungsergebnisse

In der Studie nach [LIERS 2009] werden zur Bewertung der Relevanz des EuroNCAP-Testverfahrens für das Realunfallgeschehen zwei Analysen durchgeführt. Zunächst erfolgt eine Bestimmung des Sicherheitsgewinns aus idealisierten Prüffeldreihen. Hierfür wird jeweils eine laterale Prüffeldreihe als grün und die restlichen als rot angenommen. Zusätzlich erfolgt die Bewertung eines Testergebnisses, für welches der gesamte Kopfprüfbereich als grün angenommen wird (Abbildung 3-20). Diese sieben Verteilungen werden, nach dem Vorgehen aus Abbildung 3-19, auf alle 667 Unfälle des Datensatzes angewendet.

3. Aktuelle Bewertungsmethoden von Sicherheitssystemen auf Basis von Realunfalldaten

Der optimierte Beinprüfbereich führt zu einer Reduktion um 53 bis 60 MAIS2+ verletzter Fußgänger (Abbildung 3-20). Dieser hohe Wert resultiert aus der hohen Anzahl an Verletzungen in dieser Fahrzeugregion. Ein optimierter Kopfprüfbereich hat eine Vermeidung von 27 bis 35 MAIS2+ verletzter Fußgänger zur Folge. Die beiden Verteilungen entsprechen einer EuroNCAP-Punktbewertung von Sechs bzw. 24 Punkten. Als Konsequenz wird abgeleitet, dass ein höheres EuroNCAP-Testergebnis nicht zwangsläufig mit einem höheren Sicherheitsgewinn im Realunfallgeschehen korreliert [LIERS 2009, S. 10].

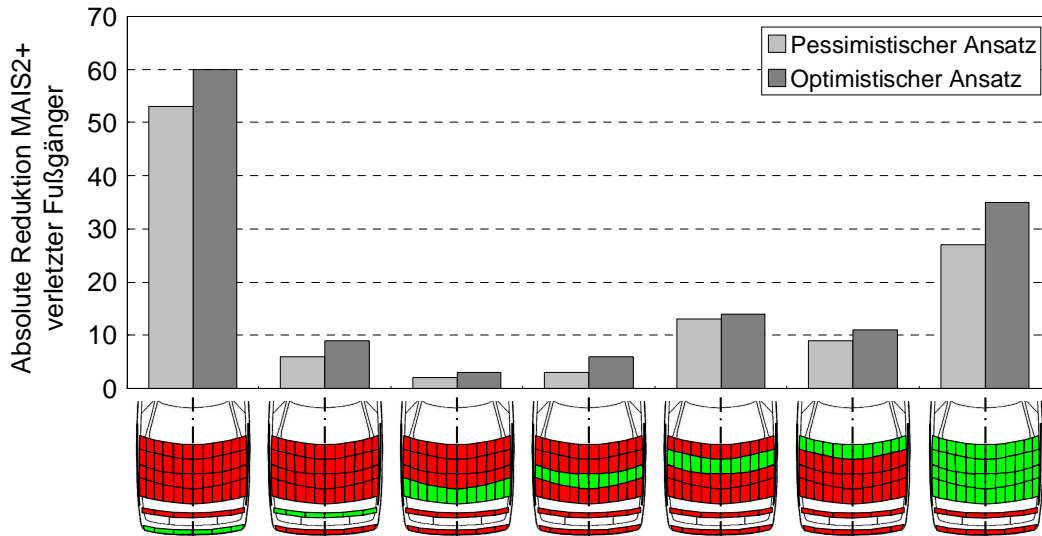


Abbildung 3-20: Bewertungsergebnisse für idealisierte EuroNCAP-Prüfsequenzen [LIERS 2009, S. 9]

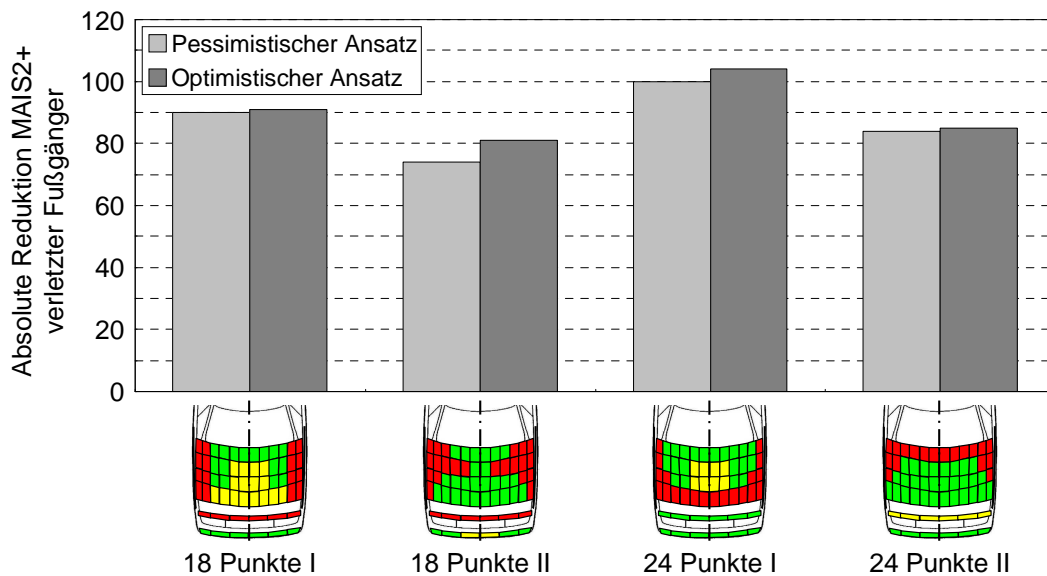


Abbildung 3-21: Bewertungsergebnisse für je zwei modellierte 18 und 24 Punkte EuroNCAP-Testergebnisse [LIERS 2009, S. 11]

3. Aktuelle Bewertungsmethoden von Sicherheitssystemen auf Basis von Realunfalldaten

Eine weitere Untersuchung zur Relevanz der EuroNCAP-Fußgängerschutzbewertung für das Realunfallgeschehen erfolgt durch die Generierung von zwei 18 Punkte und zwei 24 Punkte Testergebnissen (Abbildung 3-21). Auch diese werden auf alle Fahrzeuge der 667 adressierbaren Fußgängerunfälle angewendet und die Reduktion MAIS2+ verletzter Fußgänger bestimmt. Entsprechende Bewertungsergebnisse sind Abbildung 3-21 zu entnehmen. Daraus wird deutlich, dass der Nutzen einer 24 Punkte Verteilung verglichen mit einem 18 Punkte Testergebnis im Realunfallgeschehen unter Umständen geringer ausfällt. Ferner zeigt Abbildung 3-21, dass die Streuung des Sicherheitsgewinns innerhalb einer identischen EuroNCAP-Punktbewertung unter Umständen größer ist als der Unterschied zwischen zwei Testergebnissen, welche sechs Bewertungspunkte auseinanderliegen [LIERS 2009, S. 11].

4 PreEffect-iFGS – Methode zur Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme

Die Ausführungen in Kapitel 3 geben einen Überblick zu aktuellen Bewertungsverfahren, welche nach der Methode einer Einzelfallanalyse durchgeführt werden. Für eine Bewertung integraler Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz mit den geforderten Ansprüchen an Realitätsnähe bzw. einem Einsatz im Entwicklungsprozess stellt sich keines der Verfahren als geeignet dar. Daher erfolgte die Entwicklung eines neuen prospektiven Bewertungsverfahrens, das als PreEffect-iFGS bezeichnet wird. Auf Grund der hohen Qualität bezüglich Simulationsdatenbasis, Modellierung der Systemkomponenten, Berechnung von Verletzungsschweren und der Integration realer Versuchsergebnisse ermöglicht dieses Verfahren eine völlig neue Art der Systembewertung. Zum Beispiel besteht bisher keine Möglichkeit, Modelle der Funktionsalgorithmen in den Analyseprozess zu integrieren, welche auch für Tests im Realfahrzeug eingesetzt werden. Durch den Umstand, dass darüber hinaus reale Erprobungsergebnisse der aktiven und passiven Teilsystemkomponenten in die Bewertung eingebunden werden können, wird bereits an dieser Stelle deutlich, dass PreEffect-iFGS die bisherigen Verfahren bezüglich Bewertungsumfang und Realitätsnähe der Ergebnisse deutlich übertrifft. Folglich ordnet sich PreEffect-iFGS analog Abbildung 4-1 in den gekoppelten Produktentwicklungs- und Systembewertungsprozess ein.

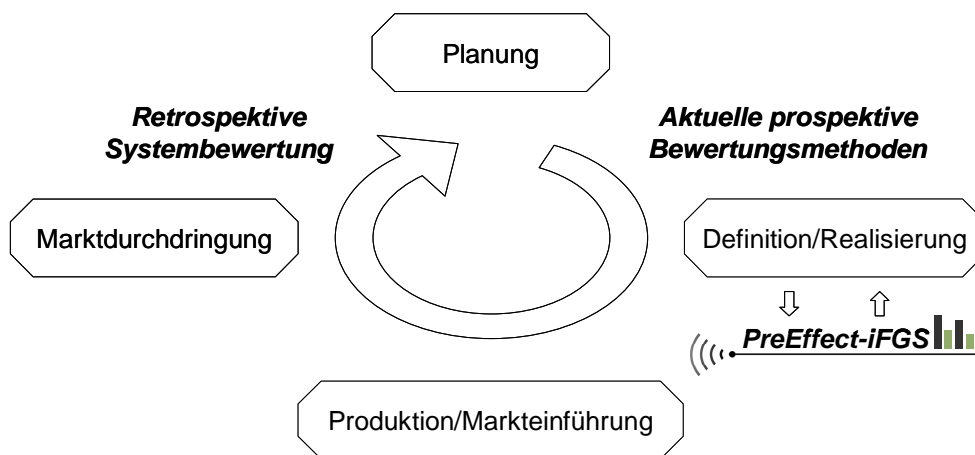


Abbildung 4-1: Einordnung von PreEffect-iFGS in den gekoppelten Produktentwicklungs- und Systembewertungsprozess

Bei der Methode PreEffect-iFGS handelt es sich daher nicht um ein Bewertungsverfahren für eine Abschätzung des Sicherheitsgewinns in der Planungsphase, sondern um eine entwicklungsbegleitende Methode zur Auslegung integraler Sicherheitssysteme nach deren Feldeffektivität. Durch die Berücksichtigung von Erkenntnissen aus der realen Erprobung im Bewertungsprozess können mit PreEffect-iFGS auch Testverfahren für integrale Sicherheits-

systeme zum Fußgängerschutz abgeleitet werden. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, den Nachweis zu führen, dass unterschiedliche Systemstrategien eine gleichwertige Feldeffektivität im Realunfallgeschehen besitzen. Ferner wird in den bisher veröffentlichten Arbeiten nicht analysiert, ob die verwendeten Verfahren zur Berechnung von Verletzungen aus den veränderten Unfallsituationen die Realität mit ausreichender Genauigkeit abbilden. Auch die Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren neben der Kollisionsgeschwindigkeit erfolgte bisher nicht, obwohl dies die Analyseergebnisse in Kapitel 2.3.3 eindeutig aufzeigen.

4.1 Wirkstrategie und Aufbau integraler Sicherheitssysteme

Der integrale Sicherheitsgedanke basiert auf einer ganzheitlichen Betrachtung fahrzeugseitiger Schutzmaßnahmen über die eigentliche Kollisionsphase hinaus. Das heißt, es erfolgt eine übergreifende Betrachtung der Fahrzeugsicherheit im gesamten Verlauf der Unfallentstehung [WIDMANN 2008]. Dieser stellt einen sehr komplexen Vorgang dar, welcher vereinfacht über die in Abbildung 4-2 dargestellten Phasen beschrieben wird.

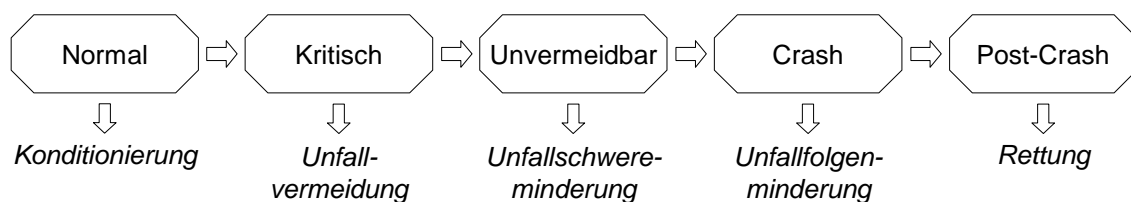


Abbildung 4-2: Fahrzustände im Prozess der Unfallentstehung und Systemstrategien integraler Sicherheitssysteme in Anlehnung an [WIDMANN 2008], [GOLLEWSKI 2008]

Die Entwicklung einer Unfallsituation erfolgt auf der Ausgangsbasis des normalen Fahrzustandes. Für den integralen Sicherheitsgedanken bedeutet dies, die Konditionssicherheit des Fahrers während der Normalfahrt durch Komfort- und Assistenzsysteme zu erhalten, so dass der sichere Fahrzustand im optimalen Fall niemals verlassen wird. Dieser wird vom kritischen Fahrzustand gefolgt, in welchem das Risiko besteht, in eine Kollision verwickelt zu werden. Zu diesem Zeitpunkt besteht die Möglichkeit, den Unfall durch geeignete Gegenmaßnahmen noch zu vermeiden. Hier ist es beispielsweise denkbar, den Fahrzeugführer durch eine Warnung auf die kritische Situation aufmerksam zu machen oder das Bremsystem vorzubereiten. Ebenso ist vorstellbar, in dieser Phase autonom agierende Systeme einzusetzen. Für konkrete Realisierungen wird auf die Systeme Audi Braking Guard [DUBA 2008], Mercedes-Benz Pre-Safe-Bremse [BOGENRIEDER 2009] und Volvo City Safety [DISTNER 2009] verwiesen.

Im anschließenden Fahrzustand ist der Unfall nicht mehr zu vermeiden. Hier besteht das Ziel eines integralen Systems darin, die Kollisionsenergie abzubauen und die Unfallbeteiligten

bestmöglich auf die bevorstehende Kollision vorzubereiten. Dementsprechend sind auch hier automatische Bremsengriffe oder die Vorbereitung passiver Sicherheitssysteme denkbar, wie diese bei den Systemen Mercedes-Benz Pre-Safe-Bremse [BOGENRIEDER 2009] und Volvo City Safety [DISTNER 2009] erfolgen. Während der Kollision wirken passive Sicherheitssysteme zur Minderung der Unfallfolgen, wie Gurt, Airbag oder ein für den Fußgängeranprall optimierter Fahrzeugvorderwagen. Hat der Unfall stattgefunden besteht die Absicht darin, schnell Hilfe zur Rettung der verunfallten Personen an den Unfallort zu holen, so dass hier das System eCall [EUROPÄISCHE KOMMISSION 2009] zur automatischen Absetzung eines Notrufs Einsatz finden kann. Aus den aufgeführten Erläuterungen wird deutlich, dass es sich bei einer Umsetzung des integralen Sicherheitsgedankens nicht um eine Kombination unterschiedlicher Fahrerassistenzsysteme handelt, sondern um neue Schutzfunktionen, welche Komponenten von bestehenden Assistenzsystemen nutzen [WIDMANN 2008]. Zur Erkennung der verschiedenen Phasen der Unfallentstehung und Einleitung eventueller Gegenmaßnahmen besitzen die hier betrachteten integralen Sicherheitssysteme neben den passiven Maßnahmen drei wesentliche aktive Komponenten (Abbildung 4-3). Diese stellen sich dar als Sensorik zur Erfassung von Informationen aus der Umgebung oder dem Fahrzeugeigenzustand, Funktionsalgorithmen, um die entsprechenden Fahrzustände zu berechnen, und Aktoren, welche Einfluss auf die Führungsgrößen der Fahrsituation nehmen.

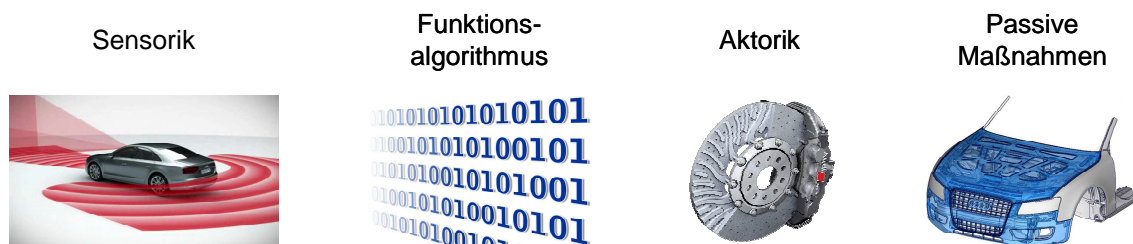


Abbildung 4-3: Systemkomponenten eines integralen Sicherheitssystems

Die vorherigen Ausführungen machen deutlich, dass integrale Systeme einen sehr großen Wirkungsbereich besitzen und folglich eine Vielzahl von Systemausprägungen denkbar ist. Daher erfolgte die Entwicklung von PreEffect-iFGS mit dem Fokus auf integrale Systemstrategien zur Unfallvermeidung und Minderung der Unfallschwere bzw. -folgen für Fußgänger-Pkw-Kollisionen. Die Definition eines Pkws orientiert sich dabei an der internationalen Klassifikation M1 [GIDAS 2008, S.292f.]. Darüber hinaus besitzen die zu untersuchenden Systeme einen Frontschutzcharakter, so dass nur Kollisionen adressiert werden, in denen das Fahrzeug vorwärts gefahren ist. Ferner erfolgt eine Einschränkung auf Systemausprägungen, die ohne Einbezug des Fahrers agieren und als Aktorik ein Bremssystem besitzen. Ausnahme bildet der Bremsassistent, da es sich bei diesem System um eine vom Fahrer zu aktivierende Maßnahme handelt.

4.2 Vorgehen zur Berechnung der Feldeffektivität

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit eines integralen Sicherheitssystems existiert eine Vielzahl von Kennwerten. Im Allgemeinen handelt es sich dabei entweder um technische Größen, wie die Kollisionsgeschwindigkeit, oder um Parameter, welche Rückschlüsse auf die Verletzungsschwere der beteiligten Personen zulassen. Im nachfolgenden Kapitel erfolgt daher zunächst eine Definition der Kenngröße Feldeffektivität. Weiter werden die Prozessschritte von PreEffect-iFGS zur Ermittlung dieses Kennwertes und die Randbedingungen, welche sich aus einer Systembewertung auf Basis von Realunfalldaten ergeben, dargelegt.

4.2.1 Definition der Kenngröße Feldeffektivität

Die Feldeffektivität stellt in dieser Arbeit das Ergebnis von PreEffect-iFGS dar, durch welche eine Quantifizierung der Leistungsfähigkeit integraler Fußgängerschutzsysteme erfolgt. Definiert ist diese als prozentuale Reduktion der Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger. Da es sich bei der Feldeffektivität um eine prozentuale Größe handelt, besteht die Möglichkeit die reduzierte absolute Anzahl verletzter Fußgänger auf verschiedene Bezugsgrößen zu beziehen. Ermittelt wird die neue Anzahl verletzter Fußgänger infolge der Systemwirkung eines integralen Sicherheitssystems auf Basis des Analysedatensatzes (Kapitel 2.3.2). Dieser beinhaltet alle für die Untersuchungen benötigten Unfallparameter. Weiter ist auch nur im Analysedatensatz eine generelle Wirkung des zu untersuchenden Frontschutzsystems zu erwarten, da der Datensatz alle Fußgänger-Pkw-Unfälle enthält, in denen die Kollision durch ein vorwärtsfahrendes Fahrzeug verursacht wird.

Eine Berechnung der prozentualen Reduktion verletzter Fußgänger bezogen auf den Analysedatensatz liefert daher einen relativ hohen Wert der Feldeffektivität, da Unfälle, in denen das System nicht wirkt, keine Berücksichtigung in der Bezugsgröße erfahren (Gl. 4-19). Die Wahl der Bezugsgröße ist im Allgemeinen frei definierbar, aber bei der Ergebnisdarstellung mit anzugeben, da ansonsten eine Interpretation der Feldeffektivität nur schwer möglich ist. Eine sinnvolle Bezugsgröße stellt für den hier vorliegenden Untersuchungsgegenstand die Anzahl mindestens Schwerverletzter im Fußgänger-Pkw-Datensatz dar (Gl. 4-18). Das berechnete Ergebnis liefert somit die Information welche Feldeffektivität in allen Fußgänger-Pkw-Kollisionen erreicht wird, wenn eine Ausstattung der Fahrzeuge mit einem integralen Sicherheitssystem erfolgt. Die Bezugsgrößen, welche Unfälle mit Kollisionsgegnern beinhalten, für die keine Ausstattung angenommen wird oder das System nicht wirkt, zum Beispiel bei rückwärtsfahrenden Fahrzeugen, begrenzen die Feldeffektivität von vornherein.

4.2.2 Übersicht der Prozessschritte von PreEffect-iFGS

Für eine Berechnung der Feldeffektivität sind eine Vielzahl von Einflussgrößen und deren Abhängigkeiten untereinander zu berücksichtigen (Abbildung 4-4). Diese leiten sich zum einen aus dem Aufbau der integralen Systeme (Abbildung 4-3) und zum anderen aus der Umgebung, in welcher die Systeme eingesetzt werden, ab. Folglich sind für eine Berechnung der Feldeffektivität in PreEffect-iFGS alle in Abbildung 4-4 aufgezeigten Einflussgrößen und deren Interaktionen zu berücksichtigen.

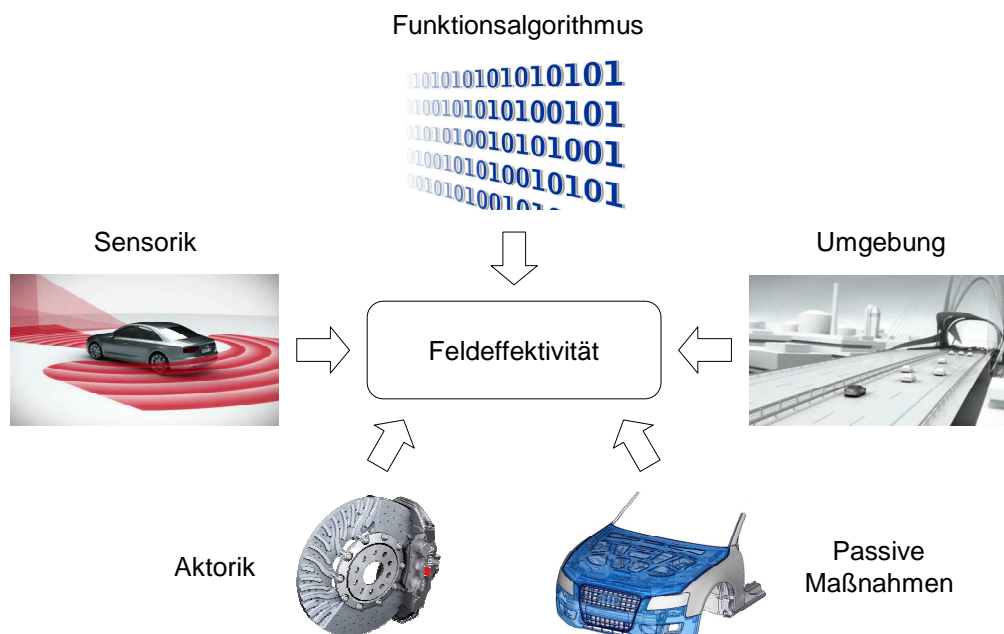


Abbildung 4-4: Einflussgrößen auf die Feldeffektivität

In Abbildung 4-5 sind die Prozessschritte von PreEffect-iFGS dargestellt. Eine Berücksichtigung der Umgebung, als Abbild der realen Kollisionssituationen, erfolgt durch Einzelfälle einer In-Depth-Datenbank, welche in dieser Arbeit exemplarisch dem Projekt GIDAS entnommen sind und als repräsentativ für das deutsche Unfallgeschehen angenommen werden (Kapitel 4.2.3). Bevor die darin enthaltenen Kollisionen verwendet werden erfolgt ein Plausibilisierungsprozess, um eine hohe Datenqualität sicherzustellen (Kapitel 2.3.1). Mit Hilfe der Informationen zu den Einzelfällen wird danach der Unfallablauf jeder einzelnen Kollision rekonstruiert. Da In-Depth-Datenbanken zurzeit lediglich eine Sammlung von Unfallparametern bereitstellen und keine simulationsfähigen Szenarien, wurde ein Verfahren entwickelt, um das Annäherungsverhalten der beiden Kontrahenten Fußgänger und Fahrzeug sowohl zeiteffizient als auch mit einer sehr hohen Genauigkeit in eine Softwareumgebung zu integrieren. Das Resultat stellt die Datenbasis für alle weiteren Analyseschritte dar (Kapitel 4.3). Als Simulationssoftware, in welcher die ursprünglichen Unfalldaten nachgebildet werden und auch die Berechnung der veränderten Kollisionssituation erfolgt, wird

PC-Crash nach [DSD 2009] herangezogen. Dabei handelt es sich um ein Computerprogramm zur Simulation von Verkehrsunfällen, welches sich als Standardlösung im Bereich der Unfallforschung und -rekonstruktion durchgesetzt hat [KÜHN 2009]. Damit ist eine korrekte Berechnung der Unfallsituationen sichergestellt.

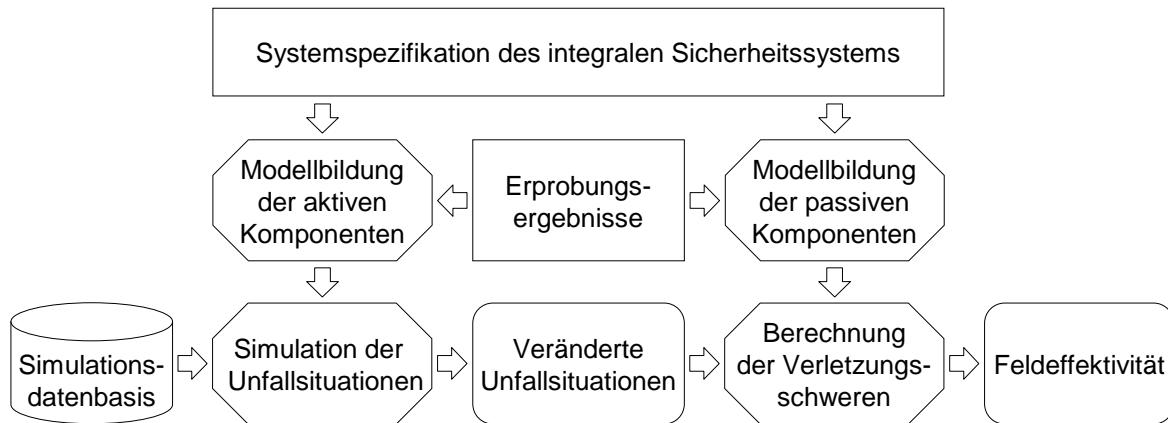


Abbildung 4-5: Übersicht der Prozessschritte von PreEffect-iFGS

Angesteuert wird dieses Programm von zwei übergeordneten Simulationsverfahren, die als PreEffect-Open- und -Closed-Loop bezeichnet werden (Kapitel 4.5). In diese beiden Verfahren erfolgt eine Integration der Modelle von Sensorik, Funktionsalgorithmus und Aktorik als Repräsentanten der aktiven Teilsystemkomponenten (Kapitel 4.4). Unter den passiven Maßnahmen wird bei Fußgängerunfällen in der Regel eine gezielte Auslegung des Vorderwagens bezüglich Geometrie und Package verstanden. Auf diese Weise wird zum einen erreicht dem Fußgänger bei einem Anprall an der Fahrzeugfront eine möglichst große Fläche zur Kräfteinleitung bereitzustellen und zum anderen die Fahrzeugkarosserie an der Energieaufnahme für einen moderaten Abbau der Fußgängerbeschleunigung zu beteiligen [KÜHN 2007, S. 120ff.]. Abhängig von der Güte des passiven Schutzniveaus führt ein Anprall, mit als konstant angenommenen Kollisionsparametern, bei guten passiven Maßnahmen zu einer leichteren Verletzung und umgekehrt. Aus diesem Grund erfolgt die Berücksichtigung einer entsprechenden passiven Fahrzeugausstattung in PreEffect-iFGS im Rahmen einer Berechnung der neu zu erwarteten Verletzungsschweren in den veränderten Kollisions-situationen. Für diesen Schritt werden Verletzungsrisikofunktionen herangezogen (Kapitel 4.6). Sowohl für die aktiven als auch passiven Teilsystemkomponenten erfolgt im Modellbildungsprozess eine Berücksichtigung von Erkenntnissen aus der Erprobung, um realitätsnahe Bewertungsergebnisse zu erzielen. Im letzten Schritt wird die Kenngröße der Feldeffektivität in Form der prozentualen Reduktion mindestens schwerverletzter Fußgänger berechnet (Kapitel 4.7).

4.2.3 Grenzen und Möglichkeiten einer Systembewertung auf Basis von Realunfalldaten

Als Datenbasis für die Analysen wird eine In-Depth-Unfalldatenbank verwendet. Für eine Integration in PreEffect-iFGS stammen die Unfalldaten exemplarisch aus dem Projekt GIDAS (Kapitel 2.3). Erhebungen dieser Art beinhalten eine sehr detaillierte Dokumentation der erfassten Kollisionssituationen (Kapitel 2.3.3). Auf Basis nationaler Unfallstatistiken, wie der amtlichen Verkehrsunfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland, sind Analysen, wie in dieser Arbeit durchgeführt oder in den unter Kapitel 3 bereits vorgestellten Bewertungsmethoden, nicht realisierbar. Aus einer Einordnung der GIDAS-Datenbank und der amtlichen Verkehrsunfallstatistik in das Spannungsfeld zwischen Informationstiefe und Fallzahl resultiert eine Darstellung nach Abbildung 4-6.

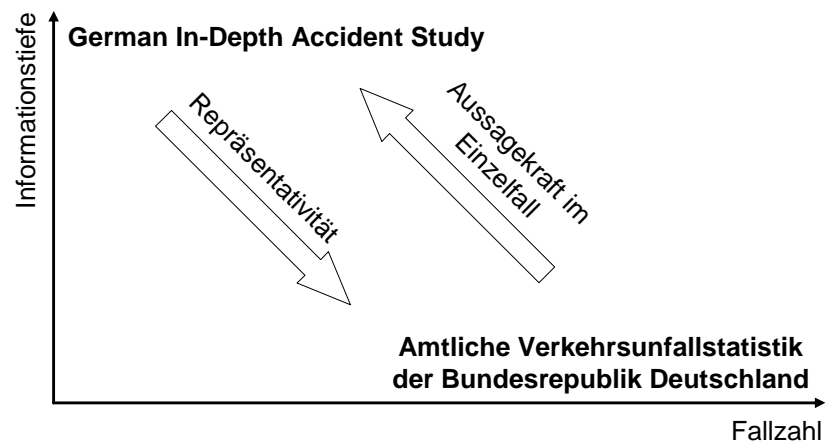


Abbildung 4-6: Zusammenhang zwischen Fallzahl bzw. Informationstiefe der GIDAS-Datenbank und der amtlichen Verkehrsunfallstatistik in Anlehnung an [APPEL 2002]

Diesen Zusammenhang belegt eine Betrachtung der Fallzahlen beider Datenbanken aus dem Jahr 2008. Daraus geht hervor, dass auf Bundesebene in etwa 86% der Unfälle reiner Sachschaden entstanden ist. Folglich verbleiben etwa 14% (320.614) mit Personenschaden [DESTATIS 2009A, S.36]. Durch das Projekt GIDAS erfolgte im gleichen Jahr eine Erhebung von etwa 2.000 Verkehrsunfällen mit Personenschaden. Dies entspricht einem Anteil von etwa 0,6% des Unfallgeschehens mit Personenschaden auf Bundesebene. Die weitaus höhere Informationstiefe der In-Depth-Datenbank verdeutlicht Kapitel 2.3.3. Generell gilt nach [GIDAS 2009, S. 3], dass auf Basis der GIDAS-Unfalldaten ermittelte Aussagen für die bundesweite Situation für diejenigen Unfallmerkmale zulässig sind, welche relativ unabhängig von regionalen Einflüssen sind. Da Kollisionsabläufe in der Regel von technischen Randbedingungen abhängig sind und Verletzungsfolgen von diesen geprägt werden, ist die Erhebung für die meisten Aspekte als repräsentativ zu betrachten.

Aus der Erhebungsmethodik des Projektes GIDAS geht hervor, dass nur eine Erfassung von Unfällen mit mindestens einer verletzten Person erfolgt. Deshalb sind in der Datenbank weder Nicht-Kollisionen noch reine Sachschadensunfälle dokumentiert. Die GIDAS-Datenbank stellt daher nur Informationen für eine Teilmenge des allgemeinen Verkehrsgeschehens bereit. Ferner finden sich in der Unfalldatenbank wenige Informationen zu nicht direkt an der Kollision beteiligten Objekten, so dass eine Modellierung der Umgebung zum Zeitpunkt des Unfalls nur schwer möglich ist. Dies bestätigen auch die Ausführungen nach [BUSCH 2005, S.65]. Weiter ist zu beachten, dass In-Depth-Unfallerhebungen im Allgemeinen nur repräsentativ für das Unfallgeschehen des jeweiligen Landes sind, in dem diese erhoben werden. Die Betrachtung weltweit durch Verkehrsunfälle getöteter Personen aus dem Jahr 2002 ergibt eine Anzahl von etwa 1,2 Millionen Menschen [WHO 2009]. Aus einem Bezug über die Bevölkerungszahl auf Deutschland [DESTATIS 2009C, S. 8] resultieren rund 16.000 Verkehrstote. Tatsächlich verunglückten in diesem Jahr 6.842 Menschen tödlich [DESTATIS 2009B, S. 5]. Daraus ist zu schließen, dass sich das Unfallgeschehen weltweit nicht gleich verteilt und eine Ermittlung der Feldeffektivität für andere Länder auf spezifischen nationalen In-Depth-Unfalldatenbanken durchzuführen ist.

4.3 Erzeugung der Simulationsdatenbasis aus realen Fußgängerunfalldaten

Die Bewertung integraler Sicherheitssysteme erfolgt in PreEffect-iFGS auf einem Abbild der realen Fußgängerunfallwelt. Wie in Kapitel 4.2.2 erläutert, stellen In-Depth-Datenbanken zwar eine detaillierte Dokumentation der Unfallsituationen bereit aber keine Simulations-szenarien, welche für eine Berechnung der Feldeffektivität benötigt werden. Aus diesem Grund erfolgte die Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Generierung der Simulationsdatenbasis, welches im nachfolgenden Kapitel erläutert wird. Auf diese Weise werden die ursprünglichen Unfallsituationen analog den Informationen aus der In-Depth-Datenbank nachgebildet. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 4-7 schematisch aufgezeigt. Daraus ist ersichtlich, dass alle Einzelunfälle sensoräquivalenten Unfalltypen zugeordnet und anschließend mit entsprechenden unfallindividuellen Größen parametrisiert werden.

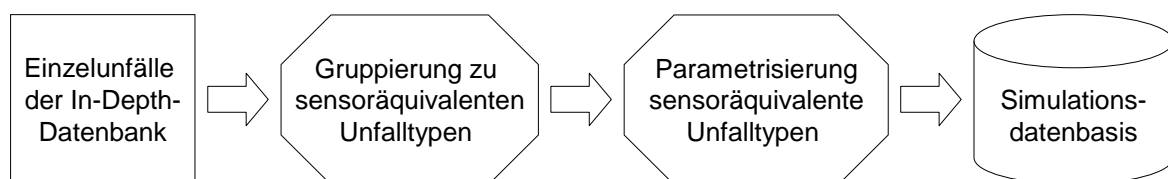


Abbildung 4-7: Schematisches Vorgehen zur Erzeugung der Simulationsdatenbasis

Aus dem Vorgehen der Gruppierung und Parametrisierung resultiert jeder Einzelunfall als Simulationsszenario, wie er in der Datenbank dokumentiert ist. Im Rahmen der nachfolgenden Analyseschritte besteht somit die Möglichkeit, das beteiligte Fahrzeug mit einem integralen Sicherheitssystem auszustatten und dessen Wirkungsweise zu untersuchen.

4.3.1 Gruppierung der Einzelunfälle zu sensoräquivalenten Unfalltypen

Sensoräquivalente Unfalltypen leiten sich aus der Besonderheit ab, dass verschiedene Unfallsituationen im Feld für die Sensorik oftmals ein äquivalentes Bild liefern. Dieses wird von mehreren Umfeldparametern, wie Straßenführung, Annäherungsrichtung des Fußgängers oder Sichtbehinderungen beeinflusst. Das bedeutet beispielsweise, dass es für einen Sensor bei gerader Bewegungsrichtung des Fahrzeugs keinen Unterschied macht, ob sich der Fußgänger auf einer geraden Straße, an einer Kreuzung oder anderen Knotenpunkten dem Fahrzeug nähert, sofern keine charakteristischen Umgebungsmerkmale zur Klassifikation der Situation berücksichtigt werden.

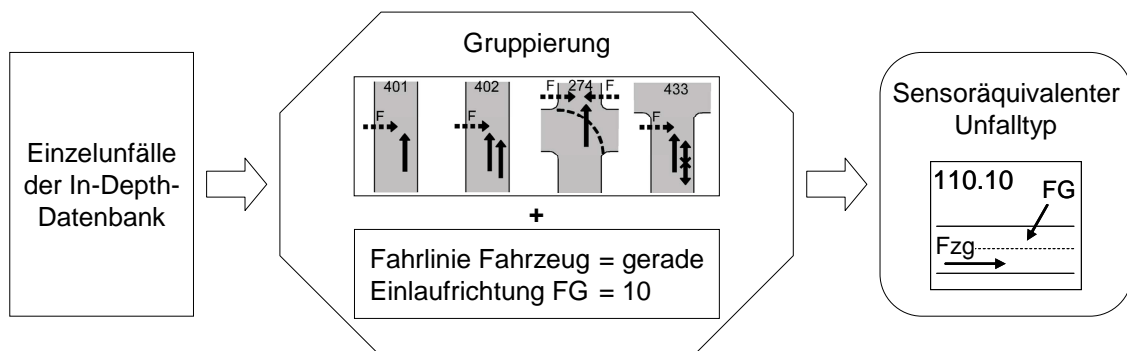


Abbildung 4-8: Exemplarische Zuordnung von Einzelunfällen zum sensoräquivalenten Unfalltyp 110.10

Die Basis für eine Definition von sensoräquivalenten Unfalltypen bildet der erweiterte Unfalltypenkatalog des HUK-Verbandes [GIDAS 2008, S.59ff.], [UDV 2010]. Im Allgemeinen beschreibt der Unfalltyp den Verkehrsvorgang, aus welchem die Kollision entstanden ist. Für Fußgängerunfälle stellt dieser in guter Näherung die tatsächliche Unfallkonstellation dar. Zu beachten ist, dass der Unfalltyp allein keine eindeutige Interpretation der Unfallkonstellation ermöglicht. Die schematische Darstellung des Unfalltyps 401 in Abbildung 4-8 suggeriert einen Unfall, welcher auf gerader Straße mit einem kreuzenden Fußgänger von links stattfindet. Dass es sich tatsächlich um eine gerade Straße handelt oder dass der Fußgänger orthogonal zum Fahrzeug die Straße kreuzt, ist damit nicht eindeutig definiert. Eine Kollision in einer Kurve mit schräg kreuzendem Fußgänger von links ohne Sichtbehinderung wird ebenfalls diesem Unfalltyp zugeordnet. Folglich liefert der Unfalltyp Informationen darüber,

ob sich die Kollision auf freier Strecke bzw. an einem Knotenpunkt ereignet, von welcher Richtung der Fußgänger auf die Straße tritt bzw. sich bereits auf dieser befindet oder ob eine Sichtbehinderung für Fahrer bzw. Fußgänger vorliegt. Der eindeutige Rückschluss auf das exakte Annäherungsverhalten der Kollisionsbeteiligten ist damit nicht definiert. Aus diesem Grund erfahren für eine Beschreibung der Bewegungsrichtungen von Fahrzeug und Fußgänger weitere Parameter Berücksichtigung. Zum einen handelt es sich dabei um Informationen zur Fahrlinie des Fahrzeugs vor dem Unfall [GIDAS 2008, S.1713f.]. Zum anderen wird für eine Bestimmung der Annäherung des Fußgängers dessen Einlaufrichtung einbezogen (Abbildung 7-9). Eine Kombination dieser Parameter mit dem Unfalltyp ermöglicht einen exakten Rückschluss auf die Unfallkonstellation. Eine Zuordnung von vier exemplarischen Unfalltypen in Kombination mit den Ausprägungen der beiden aufgeführten Größen zu einem sensoräquivalenten Unfalltyp zeigt Abbildung 4-8.

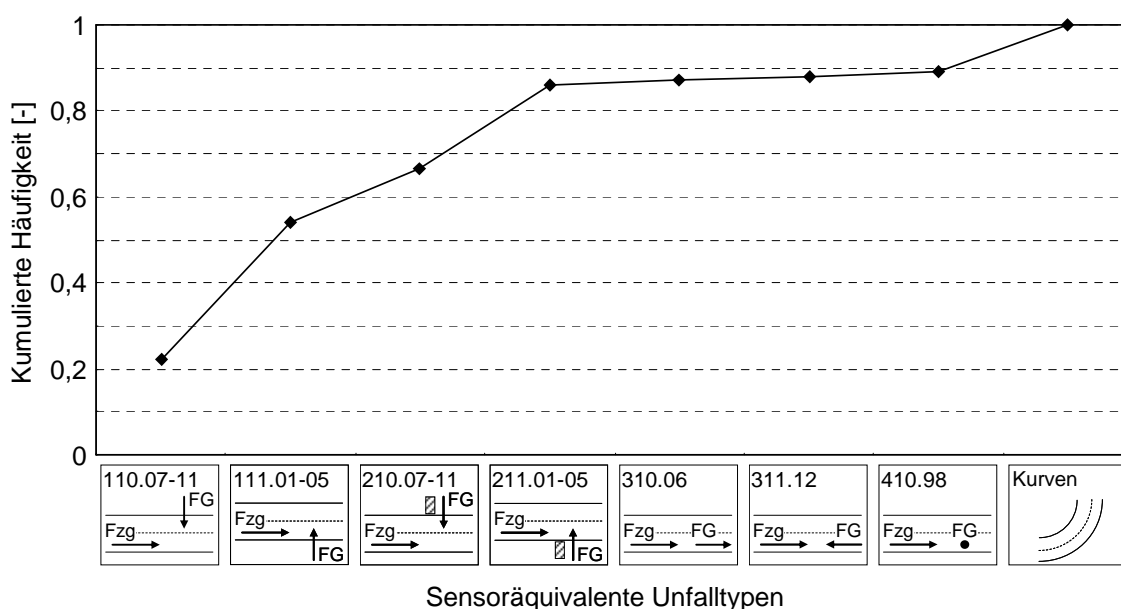


Abbildung 4-9: Kumulierte Häufigkeiten der acht globalen sensoräquivalenten Unfalltypen mit aggregierter Fußgängereinlaufrichtung im Analysedatensatz

Für eine Zuordnung aller Einzelunfälle des Analysedatensatzes werden insgesamt 22 sensoräquivalente Unfalltypen benötigt (Abbildung 7-10). Deren korrespondierende Unfalltypen und Ausprägungen der weiteren Unfallparameter für die eindeutige Klassifikation sind in Anhang 7.1 dargestellt. Ferner zeigt Abbildung 4-9 die kumulativen Häufigkeiten der acht globalen sensoräquivalenten Unfalltypen mit aggregierter Fußgängereinlaufrichtung. Daraus ist ersichtlich, dass etwa 86% der kreuzenden Fußgänger auf einer geraden Fahrbahn verunfallen. In etwa 54% der Fälle kreuzt der Fußgänger eine gerade Straße ohne Sichteinschränkung.

4.3.2 Generierung von Simulationsszenarien für Geradeausunfälle

Die genaueste Variante zur Generierung von Simulationsszenarien aus den Informationen der Realunfalldatenbank besteht darin, jede Unfallsituation manuell, unter Berücksichtigung von Unfallskizze und Bilddokumentation, aufzubauen. Für die hier verwendeten Fallzahlen im Analysedatensatz stellt sich dieses Vorgehen als nicht effizient dar. Daher wird das Annäherungsverhalten von Fahrzeug und Fußgänger automatisiert nachgebildet. Basis hierfür bildet die im vorherigen Kapitel durchgeführte Gruppierung der Einzelunfälle zu sensoräquivalenten Unfalltypen. Die Möglichkeit einer automatisierten Nachbildung beschränkt sich aus den in Kapitel 4.3.3 erläuterten Gründen auf die Geradeausunfälle. Diese Gruppe eignet sich für dieses Vorgehen sehr gut, da in diesen Fällen auf Grund der geraden Straßenführung eine sehr hohe Rekonstruktionsgüte erreicht wird. Gleichzeitig repräsentiert dieses Kollektiv mit etwa 86% den größten Teil des Fußgängerunfallgeschehens (Abbildung 4-9).

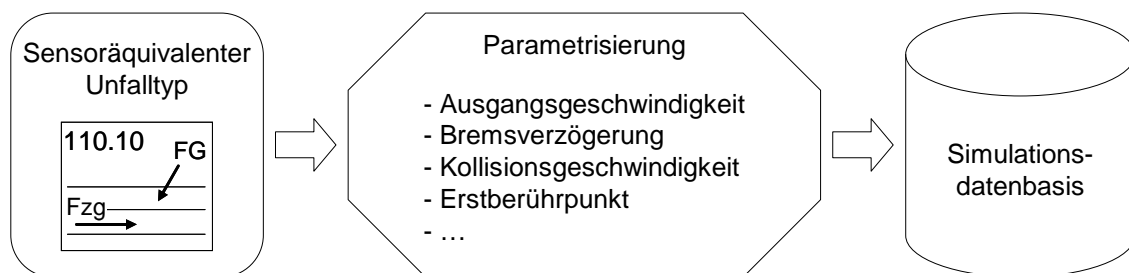


Abbildung 4-10: Exemplarische Werte zur Parametrisierung sensoräquivalenter Unfalltypen

Das Vorgehen des automatisierten Imports in die Rekonstruktionssoftware ist schematisch in Abbildung 4-7 dargestellt und charakterisiert sich durch eine Parametrisierung der sensoräquivalenten Unfalltypen mit unfallindividuellen Größen aus den zugeordneten Einzelunfällen, wie beispielsweise Geschwindigkeiten von Fahrzeug bzw. Fußgänger oder Anprallpunkten am Fahrzeug (Abbildung 4-10). Durch die Parameterauswahl ist sicherzustellen, dass zum einen der ursprüngliche Unfallverlauf eindeutig beschrieben und zum anderen die Wirkungsweise des integralen Sicherheitssystems analysiert werden kann.

Die eindeutige Zuordnung der Einzelfälle zu den sensoräquivalenten Unfalltypen in Kombination mit dem Erstberührungspunkt am Fahrzeug legt die Annäherungsrichtungen von Fahrzeug und Fußgänger bis zur Kollision eindeutig fest. Ausgehend von der Stellung zum Zeitpunkt des Konflikts erfolgt eine Berechnung der Startpositionen von Fahrzeug und Fußgänger. Grundlage bildet hierfür das Fahrerbremsmodell nach Abbildung 4-11. Diesem ist zu entnehmen, dass zur Erhöhung der Realitätsnähe die Berücksichtigung einer Bremschwellphase erfolgt. Die Bremsung beginnt zum Zeitpunkt t_0 mit dem Start der Schwellphase, in welcher sich die Verzögerung bis zu einem konstanten Niveau linear auf-

baut. Dessen Höhe wird durch die in der In-Depth-Datenbank für jeden Einzelfall dokumentierte Bremsverzögerung a_{fahrer} repräsentiert. Nach dem Zeitpunkt t_s wirkt bis zum Kollisionszeitpunkt $t_{\text{kollision}}$ diese Konstantverzögerung auf das Fahrzeug. Zur Berechnung wird für die Schwellphase ein Wert von 300 ms angenommen, welcher in einem typischen Wertebereich von 200 bis 400 ms [BURG 2007, S.103] liegt. In [ZOMOTOR 1991] und [WEIBE 2003] sind detailliertere Modelle zur Beschreibung der Bremsschwellphase beschrieben, welche für den hier vorliegenden Anwendungsfall nicht herangezogen werden, da ein Modell mit linearer Modellierung des Anstiegs bis zur Konstantverzögerung als ausreichend angesehen wird.

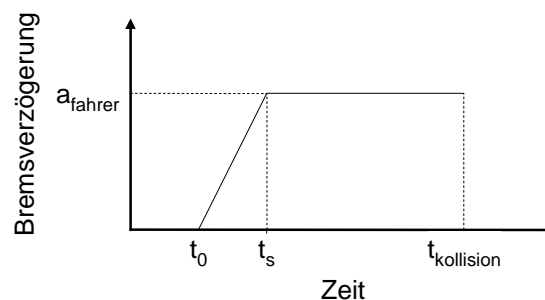


Abbildung 4-11: Modell des Fahrerbremsverhaltens
in der ursprünglichen Unfallsituation

Für eine Rückrechnung der Positionen von Fahrzeug und Fußgänger, ausgehend von der Kollisionssituation, sind zwei Fälle zu unterscheiden. Kollidiert der Fußgänger mit einem gebremsten Fahrzeug, erfolgt eine Berechnung der Ausgangsgeschwindigkeit $v_{0,\text{fzg}}$ und des Gesamtbremsweges $s_{b,\text{fzg,ges}}$ für den Pkw unter Berücksichtigung von Gl. 4-1 und Gl. 4-2, welche sich aus einer Integration des Fahrerbremsmodells nach Abbildung 4-11 ergeben. Damit ist der Abstand des Fahrzeugs vom Kollisionspunkt und die korrespondierende Ausgangsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Bremsbeginns (t_0) bekannt.

$$v_{0,\text{fzg}} = \sqrt{v_k^2 + 2 \cdot a_{\text{fahrer}} \cdot s_{b,\text{fzg}} + \frac{1}{2} \cdot a_{\text{fahrer}} \cdot t_{s,\text{fahrer}}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

- mit $v_{0,\text{fzg}}$ = Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug
 v_k = Kollisionsgeschwindigkeit Fahrzeug
 aus der In - Depth - Datenbank
 a_{fahrer} = Konstantverzögerung Fahrerbremsung
 aus der In - Depth - Datenbank
 $s_{b,\text{fzg}}$ = Konstantbremsweg Fahrzeug
 aus der In - Depth - Datenbank
 $t_{s,\text{fahrer}}$ = Schwellzeit Fahrerbremsung ($t_s - t_0$)

Da in den In-Depth-Daten keine Aussage enthalten ist welche Fahrlinie das Fahrzeug zeitlich betrachtet vor dem Bremspunkt durchfährt, ist die Annahme zu treffen, dass es davor ebenfalls mit der Geschwindigkeit $v_{0,fzg}$ und auf einer geraden Fahrlinie gefahren ist. Die zeitliche Länge dieser Phase wird mit t_{konst} bezeichnet. Unter Berücksichtigung der Phase konstanter Fahrt erfolgt die Berechnung der endgültigen Startposition des Fahrzeugs $s_{0,fzg}$, ausgehend vom Kollisionspunkt, nach Gl. 4-3. Die zeitliche Länge der Gesamtszene bestimmt sich daher neben der Bremszeit des Fahrzeugs $t_{b,fzg,ges}$ (Gl. 4-4) maßgeblich über die Höhe der Konstantfahrzeit t_{konst} .

$$s_{b,fzg,ges} = s_{b,fzg} + v_{0,fzg} \cdot t_{s,fahrer} - \frac{1}{6} \cdot a_{fahrer} \cdot t_{s,fahrer}^2 \quad \text{Gl. 4-2}$$

mit $s_{b,fzg,ges}$ = Gesamtbremsweg Fahrzeug
 $s_{b,fzg}$ = Konstantbremsweg Fahrzeug aus
 der In - Depth - Datenbank
 $v_{0,fzg}$ = Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug
 a_{fahrer} = Konstantverzögerung Fahrerbremsung aus
 der In - Depth - Datenbank
 $t_{s,fahrer}$ = Schwellzeit Fahrerbremsung ($t_s - t_0$)

$$s_{0,fzg} = s_{b,fzg,ges} + s_{konst,fzg} = s_{b,fzg,ges} + v_{0,fzg} \cdot t_{konst} \quad \text{Gl. 4-3}$$

mit $s_{0,fzg}$ = Startposition Fahrzeug
 $s_{b,fzg,ges}$ = Gesamtbremsweg Fahrzeug
 $v_{0,fzg}$ = Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug
 t_{konst} = Konstantfahrzeit

$$t_{b,fzg,ges} = \frac{v_{0,fzg} - v_k}{a_{fahrer}} + \frac{1}{2} \cdot t_{s,fahrer} \quad \text{Gl. 4-4}$$

mit $t_{b,fzg,ges}$ = Gesamtbremszeit Fahrzeug
 $v_{0,fzg}$ = Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug
 v_k = Kollisionsgeschwindigkeit Fahrzeug
 aus der In - Depth - Datenbank
 a_{fahrer} = Konstantverzögerung Fahrerbremsung
 aus der In - Depth - Datenbank
 $t_{s,fahrer}$ = Schwellzeit Fahrerbremsung ($t_s - t_0$)

Für den Fußgänger erfolgt eine Berechnung der Startposition $s_{0,fg}$, ausgehend von der Kollisionsstellung, nach Gl. 4-5 über den zurückgelegten Weg während der Bremszeit des Fahrzeugs $t_{b,fzg,ges}$ (Gl. 4-4) und dessen Konstantfahrzeit t_{konst} . Dabei wird für den Fußgänger eine konstante Einlaufgeschwindigkeit $v_{0,fg}$ unterstellt. Zur Transformation der qualitativen Angaben in der Datenbank erfolgt ein Ersetzen der textuellen Ausprägungen durch korrespondierende Werte für die entsprechende Fußgängergeschwindigkeit nach [BURG 2007, S. 335f.]. Auch hier gilt, dass sich der Fußgänger über die gesamte Dauer des Szenarios mit der Geschwindigkeit $v_{0,fg}$ und auf der individuellen Einlauftrajektorie nach Abbildung 7-9 bewegt. Ein entsprechendes Vorgehen erfolgt zur Bestimmung der Ausgangspositionen von Fahrzeug und Fußgänger in ungebremsten Unfällen, wobei für diesen Fall die Gleichungen aus Anhang 7.2 angewendet werden.

$$s_{0,fg} = v_{0,fg} \cdot (t_{b,fzg,ges} + t_{konst}) \quad \text{Gl. 4-5}$$

mit $s_{0,fg}$ = Startposition Fußgänger
 $v_{0,fg}$ = Gehgeschwindigkeit Fußgänger
aus der In - Depth - Datenbank
 $t_{b,fzg,ges}$ = Gesamtbremszeit Fahrzeug
 t_{konst} = Konstantfahrzeit

Die unfallindividuellen, nach obigem Vorgehen berechneten, Startpositionen werden in Kombination mit dem Fahrerbremsverhalten automatisiert in die verwendete Unfallrekonstruktionssoftware nach [DSD 2009] importiert. Das Fahrzeug und der Fußgänger werden somit ausgehend vom Kollisionspunkt an die entsprechenden Startpositionen gesetzt und der zeitliche Bremsverlauf des Fahrers nach Abbildung 4-11 im Softwareprogramm hinterlegt. Dieser Prozess erfolgt für alle Einzelunfälle im Analysedatensatz unter Berücksichtigung des zugeordneten sensoräquivalenten Unfalltyps (Abbildung 7-10). Aus diesem Vorgehen resultiert für jeden Einzelunfall des Analysedatensatzes ein Simulationsszenario, welches analog den Informationen der In-Depth-Unfalldatenbank aufgebaut ist und die Basis für die weiteren Analysen zur Systemwirkungsweise bildet. Zur Verdeutlichung dieser Schritte ist das Vorgehen für die Berechnung der Startpositionen an einem gebremsten Unfall exemplarisch in Abbildung 4-12 dargestellt.

Zur Überprüfung der Nachbildungsgüte erfolgt eine Vorwärtssimulation der automatisch erzeugten Simulationsszenarien ohne modelliertem Sicherheitssystem und ein anschließender Abgleich mit den korrespondierenden Werten der In-Depth-Datenbank. Die kumulierten Häufigkeiten für die Abweichungen der Kollisionsgeschwindigkeiten und Berührungspunkte am Fahrzeug in x_r - bzw. y_r -Richtung [GIDAS 2008, S. 1436f.] sind in Abbildung 4-13 und

Abbildung 4-14 dargestellt. Die maximale Differenz zwischen simulierter und dokumentierter Kollisionsgeschwindigkeit liegt mit weniger als 1,5 km/h deutlich unter der Toleranzgrenze, welche in der Datenbank für diesen Parameter ausgewiesen wird. Ebenso verdeutlichen die Abweichungen in x_r - bzw. y_r -Richtung (Abbildung 7-9) mit weniger als 50 mm bzw. maximal 100 mm ebenfalls eine hohe Nachbildungsgüte. Folglich eignet sich das oben dargestellte Verfahren der Einzelfallnachbildung sehr gut, um automatisiert qualitativ hochwertige Unfall-szenarien aus den Informationen einer In-Depth-Datenbank zu erzeugen.

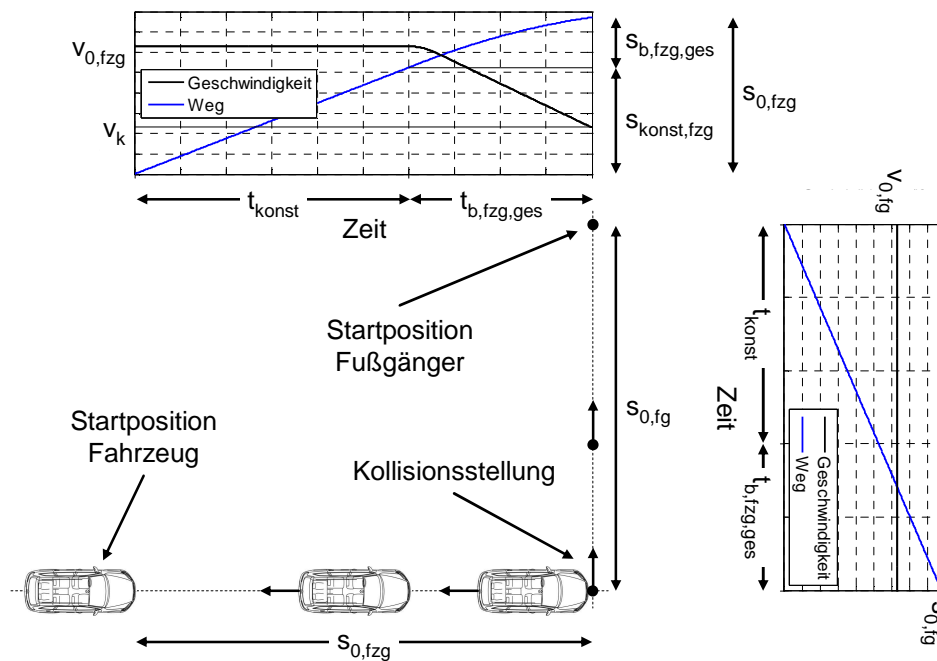


Abbildung 4-12: Vorgehen zur Parametrisierung des sensoräquivalenten Unfalltyps 110.09 für einen gebremsten Unfall

Für Einzelunfälle, welche sensoräquivalenten Unfalltypen mit Sichtbehinderungen zugeordnet sind (Abbildung 4-9), kann die exakte Position des Hindernisses der In-Depth-Datenbank nicht direkt entnommen werden. Die Begutachtung einer Stichprobe von Unfällen mit Sichtbehinderung und eine Vermessung der Abstände zwischen Hindernis und Kollisionspunkt ergeben einen mittleren Wert von etwa zwei Metern. Daher erfolgt eine Positionierung des Hindernisses für Unfälle mit Sichteinschränkung in einer entsprechenden Distanz vom Kollisionspunkt. Dies erfolgt derart, dass der Fußgänger erst nach Passieren der Barriere für den Fahrer bzw. die Sensorik sichtbar wird. Für jedes Unfallszenario wird zur Nachbildung ein Fahrzeug- und ein Fußgängermodell verwendet. Für das Fahrzeugmodell erfolgt eine Adaption in Länge und Breite an die unfallindividuellen Ausprägungen. Da in der hier verwendeten Softwareversion die Modellierung des Fahrzeugs als rechteckige Kontur erfolgt, werden alle Berührungspunkte in x_r -Richtung (Abbildung 7-9), welche kleiner als 200 mm sind, als Anprall an der Fahrzeugfront behandelt.

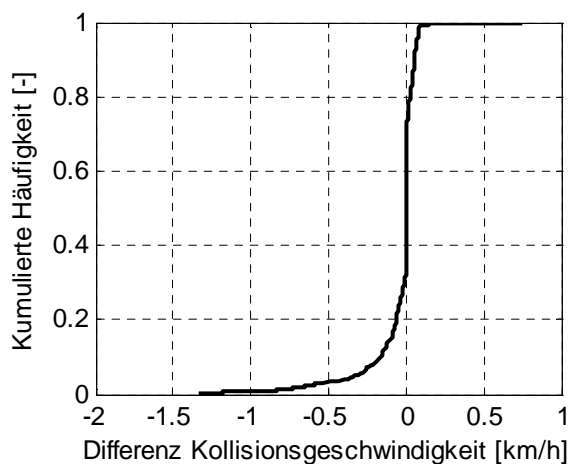


Abbildung 4-13: Abweichungen der Kollisionsgeschwindigkeit zwischen Simulationsdatenbasis und In-Depth-Datenbank

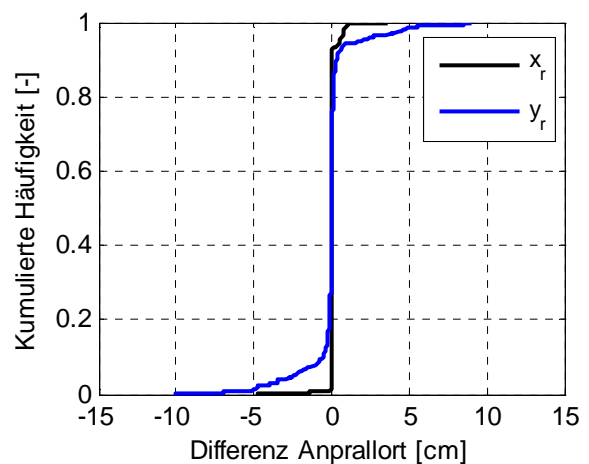


Abbildung 4-14: Abweichungen des Anprallortes am Fahrzeug zwischen Simulationsdatenbasis und In-Depth-Datenbank

Für die nachfolgende Bewertung eines Sicherheitssystems sind neben den Größen zur eindeutigen Beschreibung der ursprünglichen Unfallsituation weitere Informationen erforderlich. Exemplarisch ist diesbezüglich die maximal übertragbare Bremsverzögerung zu nennen, welche für jeden Unfall aus der Kombination von Fahrbahnoberfläche und Fahrbahnzustand abgeleitet wird. Zur Quantifizierung erfolgt, ähnlich der Fußgängergeschwindigkeit, eine Transformation der textuellen Ausprägungen durch entsprechende Durchschnittswerte aus der Literatur nach [BURG 2007, S. 392f.]. Wie in Kapitel 4.2.3 erläutert, finden sich in der In-Depth-Datenbank nur eingeschränkte Informationen zur Umgebung zum Zeitpunkt der Kollision, so dass die Einzelunfallszenarien neben den beiden Objekten Fahrzeug, Fußgänger und eventuelle Sichthindernisse keine weiteren Objekte beinhalten.

4.3.3 Generierung von Simulationsszenarien für Kurvenunfälle

Eine automatisierte Generierung von Kurvenunfällen ist analog dem Vorgehen aus Kapitel 4.3.2 nur sehr eingeschränkt durchführbar, wenn eine hohe Modellierungsgüte vorausgesetzt wird. Dies begründet sich durch die großen Variationen von Abbiege- und Kurvenunfällen, für welche eine Beschreibung durch die beiden, in der In-Depth-Datenbank dokumentierten, Größen Kurvenradius und -winkel nur bedingt ausreicht. Eine Erzeugung von Unfallszenarien für Kurvenfahrten in der Simulationsumgebung mit Genauigkeitsanforderungen analog den Geradeausunfällen, ist daher nur manuell unter Zuhilfenahme von Unfallskizzen und Luftbildern möglich. Da sich die Anzahl an Fußgängerunfällen infolge von Kurvenfahrten oder Abbiegevorgängen als relativ gering erweist (Abbildung 4-9), erfolgt für diese Fälle eine manuelle Nachbildung. Auch für diese Fälle gelten die Annahmen und Randbedingungen

aus Kapitel 4.3.2, so dass auch in diesen Szenarien eine Modellierung des Fahrerbremsverhaltens nach Abbildung 4-11 erfolgt. Da diesen Unfallszenarien im Rahmen der Nachbildung die Unfallskizzen zugrunde liegen, in welchen auch eventuelle Sichtbehinderungen eingetragen sind, erfolgt deren Positionierung nicht mehr durch eine pauschale Annahme, sondern unfallindividuell nach dem dokumentierten Ort.

4.4 Modellbildung aktiver Teilsystemkomponenten

Die Systemstrategie und der daraus resultierende Aufbau integraler Sicherheitssysteme werden in Kapitel 4.1 erläutert. Zur Analyse des Gesamtsystemverhaltens erfolgt in PreEffect-iFGS eine Modellbildung der darin beschriebenen Teilsystemkomponenten und deren Interaktion. Die aktiven und passiven Bausteine werden nach den Ausführungen von Kapitel 4.2.2 in zwei unterschiedlichen Prozessschritten berücksichtigt. Aus diesem Grund sind die passiven Komponenten in Abbildung 4-15, welche den chronologischen Ablauf des Informationsflusses der aktiven Systemkomponenten zeigt, nicht dargestellt. Deren Modellbildung wird in Kapitel 4.6 beschrieben.

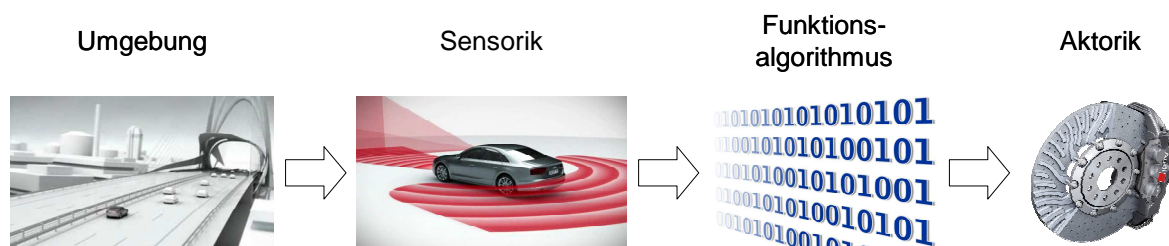


Abbildung 4-15: Anordnung der aktiven Teilsystemkomponenten im chronologischen Informationsfluss

Die Teilsystemkomponente Sensorik setzt sich zusammen aus Fahrzeugeigen- bzw. Umfellsensorik und nimmt Informationen zum Eigenfahrzeug bzw. der Umgebung auf. Diese werden an den Funktionsalgorithmus weitergeleitet, welcher darauf basierend den aktuellen Fahrzustand berechnet. In Abhängigkeit einer definierten Wirk- und Auslösestrategie erfolgt von diesem eine Ansteuerung von Aktoren, um gezielt Einfluss auf die Fahrsituation zu nehmen. Um integrale Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz bewerten zu können, wurden die aktiven Teilsystemkomponenten, repräsentiert durch Sensorik, Funktionsalgorithmus und Aktorik als Modelle in PreEffect-iFGS eingebunden. Auf Grund der Anforderung an eine Einsetzbarkeit der Bewertungsmethode im Entwicklungsprozess erfolgte die Entwicklung von Modellen, welche es ermöglichen den jeweiligen Erkenntnisstand in den verschiedenen Phasen einer Systementwicklung zu berücksichtigen.

4.4.1 Modellbildung der Sensorik

Die Entscheidung des Funktionsalgorithmus, ob eine Situation zur Aktivierung von Aktoren vorliegt, erfolgt auf Basis von Sensorsignalen, welche diesem in Form von Objektlisten aus der Fahrzeugeigen- und Umfeldsensorik zur Verfügung gestellt werden. Die Fahrzeugeigen-sensorik sendet Größen, wie beispielsweise Raddrehzahl oder Querschleunigung. Die Umfeldsensorik liefert Informationen über die Umgebung, welche das Fahrzeug umgibt, beispielsweise die Positionen und Geschwindigkeiten von Objekten außerhalb des Fahrzeugs. PreEffect-iFGS ist derart gestaltet, dass beliebige Sensormodelle frei integrierbar sind. Basis für diesen Prozess bilden die Bewegungsgrößen von Fahrzeug und Fußgänger oder die Positionen von Sichtbehinderungen, welche von der Softwareumgebung nach [DSD 2009] bereitgestellt werden und in Form der Simulationsrohdaten die Eingangsgrößen für das Sensormodell darstellen (Abbildung 4-16). In diesem erfolgt eine Verarbeitung der Eingangssignale. Zum Beispiel wird berechnet, wann der Fußgänger in den Sensorsichtbereich eintritt, oder ob dieser durch eine Sichtbehinderung verdeckt wird. Als Ergebnis liefert das Sensormodell Objektlisten. Darunter wird in dieser Arbeit eine standardisierte, algorithmus-spezifische Aufbereitung der Informationen zu den detektierten Objekten verstanden.

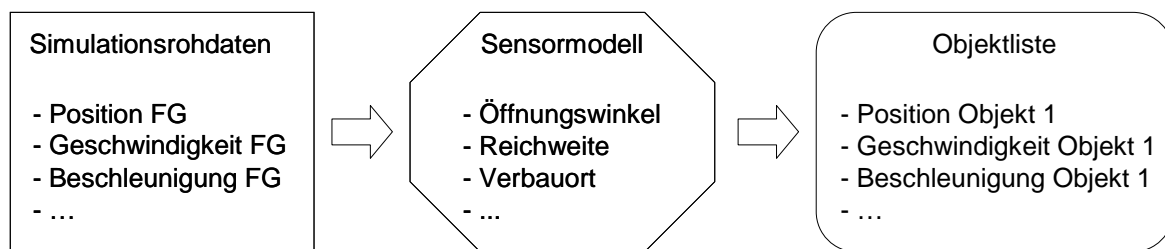


Abbildung 4-16: Prozess zur Verarbeitung der Simulationsrohdaten im Sensormodell und Erzeugung von Objektlisten

Ein Sensormodell, das als mögliche Variante umgesetzt und für die Analysen in Kapitel 5 angewendet wird, ist in Abbildung 4-17 dargestellt. Dessen Sichtbereich und Lage sind über die Größen Öffnungswinkel, Reichweite, Blickrichtung und Verbauort spezifizierbar. Weiter ist über die Zykluszeit einstellbar in welchen Zeitabständen Informationen aus der Umgebung aufgenommen werden und nach welcher Latenzzeit ein Objekt als erkannt angenommen wird. Berücksichtigung erfährt auch die sensorinterne Rechenzeit, durch welche der zeitliche Verzug für eine Übergabe der Objektliste an den Funktionsalgorithmus definiert ist. Auf Grund der allgemeinen Implementierung der Komponente Sensorik können durch eine entsprechende Verarbeitung der Simulationsrohdaten beliebig komplexe Realisierungen für Sensormodelle in PreEffect-iFGS erzeugt werden. Diese basieren beispielsweise auf realen Erprobungserkenntnissen, welche durch Fahrversuche an einer Fußgängerschutzanlage ermittelt werden (Abbildung 4-18, Abbildung 4-19).

Dabei handelt es sich um eine Konstruktion, welche einen Fußgängerdummy quer über die Fahrbahn und kurz vor der Kollision nach oben aus dem Gefahrenbereich zieht, so dass eine zerstörungsfreie Erprobung erfolgt. Die Anlage ist sowohl für Fahrten im Längs- und Abbiegeverkehr geeignet. Das Fahrzeug, welches auf den Fußgänger zufährt, ist mit einer Umfeldsensorik ausgestattet, so dass eine Aufzeichnung der Signale während der Testfahrt erfolgt [ROTH 2008A], [ROTH 2008B].

| Parameter | Spezifikation |
|-------------------------|-----------------|
| Öffnungswinkel | [Grad] |
| Reichweite | [m] |
| Blickrichtung | [Grad] |
| Verbauort in x-Richtung | [m] |
| Verbauort in y-Richtung | [m] |
| Zykluszeit | [s] |
| Latenzzeit | [Anzahl Zyklen] |
| Interne Rechenzeit | [s] |

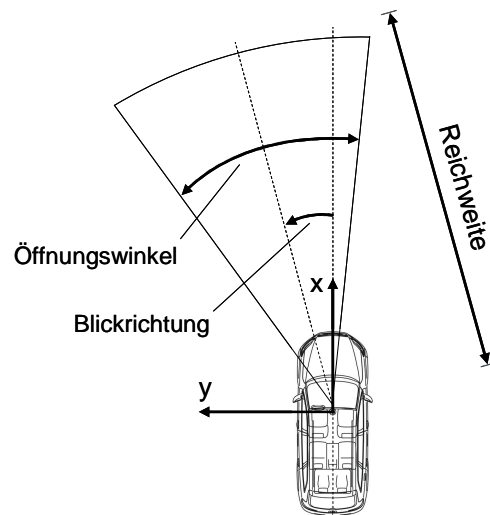


Abbildung 4-17: Exemplarisches Sensormodell zur Detektion des Fußgängers

Zur Definition des Versuchsaufbaus werden Informationen aus der In-Depth-Datenbank verwendet. Da es aus Zeit- und Ressourcengründen nicht möglich ist jeden Einzelfall des Analysedatensatzes nachzufahren, um das spezifische Sensorverhalten zu untersuchen, erfolgt zur Ableitung von Testszenarien ein Gruppierungsprozess. Basis für diesen bilden die sensoräquivalenten Unfalltypen aus Kapitel 4.3.1.



Abbildung 4-18: Aufbau der Fußgängerschutztestanlage [ROTH 2008A]



Abbildung 4-19: Fußgängerschutzanlage im Testbetrieb [AUDI 2010]

4. PreEffect-iFGS – Methode zur Berechnung der Feldeffektivität

Die Einzelunfälle mit einem kreuzenden Fußgänger werden analog Abbildung 4-20 zusammengefasst, so dass sich aus den sensoräquivalenten Unfalltypen 110.07 bis 110.11 der Testfall FG_01 ableitet. Nach äquivalentem Vorgehen erfolgt eine Definition des Test-szenarios FG_02 für die sensoräquivalenten Unfalltypen 210.07 bis 210.11. Aus Symmetriegründen [ROTH 2008A] decken die Testfälle FG_01 und FG_02 auch die sensoräquivalenten Unfalltypen 111.01 bis 111.05 und 211.01 bis 211.05 (Abbildung 4-9) mit ab. Der Testfall FG_03 beinhaltet die verbleibenden Einzelunfälle.

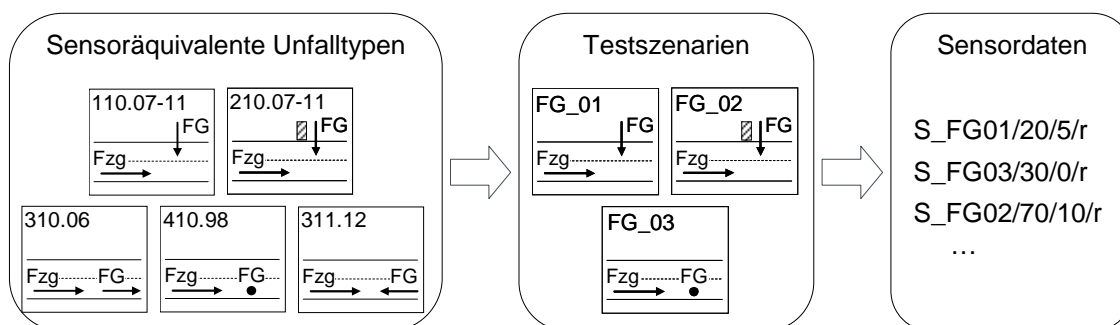


Abbildung 4-20: Ableitung von Testszenarien aus sensoräquivalenten Unfalltypen in Anlehnung an [ROTH 2008A], [ROTH 2009]

Die Testgeschwindigkeiten von Fahrzeug und Fußgänger sowie prognostizierte Anprallorte im Fall einer Kollision für die Testszenarien FG_01 bis FG_03 sind in Abbildung 4-21 dargestellt. Diese leiten sich aus einer Analyse der Einzelunfälle der entsprechenden sensoräquivalenten Unfalltypen ab, welche durch die drei Testszenarien repräsentiert werden. Abbildung 4-21 ist zu entnehmen, dass die ersten beiden Testfälle mit Fahrzeug- bzw. Fußgängergeschwindigkeiten von 20, 40 und 70 km/h bzw. 5 und 10 km/h durchgeführt werden.

| Testszenario | v_{fg} [km/h] | Anprallort [-] | $v_{0, fzg}$ [km/h] | | |
|--------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------|----|----|
| | | | 20 | 40 | 70 |
| FG_01 | 5 10 | links (l) rechts (r) mittig (m) | 20 | 40 | 70 |
| FG_02 | 5 10 | links (l) rechts (r) mittig (m) | 20 | 40 | 70 |
| FG_03 | 0 | links (l) rechts (r) mittig (m) | 30 | 50 | 70 |

Abbildung 4-21: Definition exemplarischer Fußgängertestfälle in Anlehnung an [ROTH 2009]

Weiter wird der Fußgänger derart über die Straße geführt, dass sich je Testszenario ein links- bzw. rechtsseitiger und mittiger Anprallort am Fahrzeug ergibt. Für den Testfall FG_03 wird der Fußgänger nicht bewegt, die Fahrzeuggeschwindigkeit in den Stufen 30, 50 und 70 km/h variiert und es werden ebenfalls die drei verschiedenen Anprallorte erzeugt. Insgesamt ergeben sich mit diesem Versuchsdesign 45 Testfälle, für welche die vom Sensor erfassten Daten aufgezeichnet werden (Abbildung 4-20).

Damit besteht die Möglichkeit, die Erkennungsleistung der Sensorik oder aus der Sensortechnologie resultierende Effekte zu analysieren und für die Entwicklung von Sensormodellen zu berücksichtigen. Die generische Implementierung der Sensorik nach Abbildung 4-16 schafft folglich die Voraussetzung, Realisierungen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad flexibel in PreEffect-iFGS zu integrieren. Auf diese Weise können sowohl ideale als auch realitätsnahe Sensormodelle und folglich der jeweilige Entwicklungs- und Erkenntnisstand in das Bewertungsverfahren eingebunden werden.

4.4.2 Modellbildung des Funktionsalgorithmus

Zur Bestimmung des aktuellen Fahrzustandes besitzen integrale Sicherheitssysteme einen Funktionsalgorithmus. Dieser berechnet unter Berücksichtigung der Informationen, welche von der Fahrzeugeigen- oder Umfeldsensorik zur Verfügung gestellt werden, in welcher Fahrsituation sich das Fahrzeug befindet (Abbildung 4-2) und ob eine Aktivierung von Aktoren erforderlich ist. In PreEffect-iFGS existieren drei verschiedene Realisierungen zur Festlegung bzw. Bestimmung des Auslösezeitpunktes. Die erste Variante stellt sich dar als Time-To-Collision (TTC). Dabei handelt es sich um keinen Funktionsalgorithmus im eigentlichen Sinne, sondern um eine ideale zeitliche Vorgabe der Aktorauslösung vor dem Kollisionszeitpunkt. Da die Unfallszenarien der Simulationsdatenbasis für jeden Einzelunfall die Information beinhalten zu welchem Zeitpunkt die Kollision stattfindet, ist eine Berechnung der Aktorauslösung zu diesem Moment durchführbar.

Darüber hinaus erfolgt die Einbindung von Funktionsalgorithmen, welche auch im Realfahrzeug eingesetzt werden. Diese charakterisieren sich durch eine Berechnung des Auslösezeitpunktes auf Basis aktuell verfügbarer Informationen oder in Kombination mit Zustandsgrößen aus der Vergangenheit. Diese Algorithmen erhalten als Eingangsgrößen die Objektlisten, welche vom Sensormodell bereitgestellt werden (Kapitel 4.4.1), um die zeitliche Entwicklung des Fahrzustandes zu bestimmen. Ein Beispiel für einen derartigen Funktionsalgorithmus ist in [BOTSCH 2010] dargestellt. Dabei handelt es sich um einen Ansatz zur Berechnung des Zeitpunktes, zu dem eine Kollision nicht mehr zu vermeiden ist. Dies erfolgt durch eine Prädiktion der Aufenthaltsorte von Eigenfahrzeug und potentiellen Kollisions-

gegnern unter Berücksichtigung physikalischer Bewegungsmodelle. Das bedeutet, durch die Einbindung von Algorithmusmodellen in PreEffect-iFGS, wie diese auch im Realfahrzeug eingesetzt werden, erfolgt eine Berechnung des Auslösezeitpunktes auf Basis der Informationen, welche von einem Sensormodell bereitgestellt werden.

Anstelle der Berücksichtigung einer Time-To-Collision für alle Einzelfälle der Datenbasis oder einer unfallindividuellen Berechnung des Auslösezeitpunktes durch ein reales Algorithmusmodell in der Simulation, können die Aktivierungszeitpunkte einer Aktorik auch einzelfall-spezifisch festgelegt werden. Diese Auslösezeitpunkte stammen aus der realen Erprobung einer Kombination aus Sensorik und Funktionsalgorithmus. Zur Bestimmung dieser Zeitpunkte im Realversuch werden die 45 in Kapitel 4.4.1 definierten Testfälle für eine Erprobung an der Fußgängerschutztestanlage herangezogen. Da sich die Testfälle aus sensoräquivalenten Unfalltypen ableiten, bilden diese gleichzeitig eine Schnittstelle zurück in die Realunfalldatenbank und folglich auf die zugrundeliegenden Einzelunfälle. Durch eine Auswertung der real aufgezeichneten Sensordaten in einem Algorithmusmodell werden für die 45 Testvarianten nach Abbildung 4-21 die realen Aktivierungszeitpunkte eines Funktionsalgorithmus bestimmt. Für eine direkte Übertragung dieser Ergebnisse auf alle Einzelunfälle des Analysedatensatzes reichen die 45 getesteten Geschwindigkeitskombinationen von Fahrzeug und Fußgänger nicht aus, so dass die Definition einer Abbildungsvorschrift zur Übertragung dieser Stützstellen auf Unfälle ähnlicher Konstellation erfolgt (Abbildung 4-22).

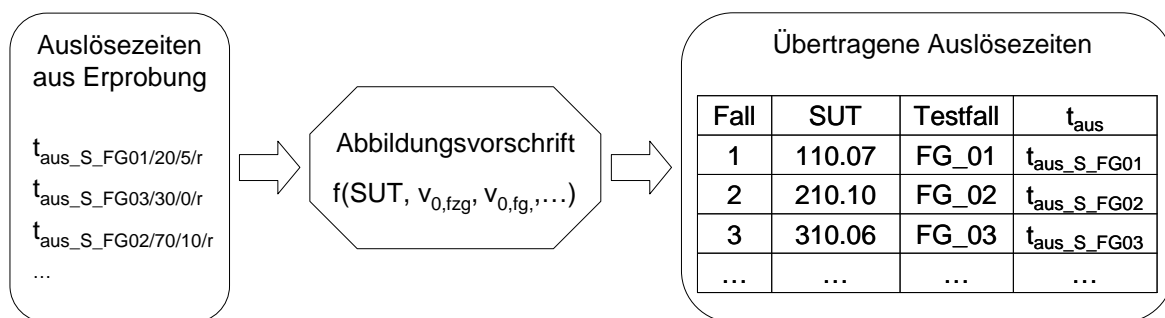


Abbildung 4-22: Schematisches Vorgehen zur Rückspiegelung der realen Auslösezeiten aus der Erprobung auf die Einzelunfälle der In-Depth-Datenbank

Der Grundgedanke basiert darauf, die Resultate der 45 Testfälle unter Berücksichtigung von sensoräquivalentem Unfalltyp (SUT) und beispielsweise Geschwindigkeiten von Fahrzeug bzw. Fußgänger oder Anprallort auf Kollisionssituationen zu übertragen, in welchen ähnliche Auslösezeiten zu erwarten sind. Eine exemplarische Abbildungsvorschrift zur Rückspiegelung der Erprobungserkenntnisse für eine gegebene Kombination aus Sensorik und Funktionsalgorithmus ist in Kapitel 5.1.2 dargestellt. Im Unterschied zur Auswertung eines realen Algorithmusmodells mit Sensordaten aus der Simulationsumgebung basiert die Aktivierung einer Aktorik vor Kollision in diesem Fall auf Auslösezeiten aus dem Realversuch.

Aus den unterschiedlichen Modellen der Komponente Funktionsalgorithmus wird deutlich, dass, analog einer Integration der Komponente Sensorik (Kapitel 4.4.2), unterschiedlich detaillierte Realisierungen des Funktionsalgorithmus in PreEffect-iFGS eingebunden werden können, um eine entwicklungsbegleitende Systembewertung durchzuführen.

4.4.3 Modellbildung der Aktorik

Im Allgemeinen wandeln Aktoren Eingangsgrößen in andersartige Ausgangsgrößen, um gewünschte Effekte hervorzurufen. Wie in Kapitel 4.1 dargelegt, erfolgt in PreEffect-iFGS die Einschränkung auf die Aktorik der Bremse, welche als Effekt eine Verzögerung des Fahrzeugs hervorruft. Der Vorgang einer Bremsaktivierung gliedert sich in zwei Abschnitte. Ausgehend von der ursprünglich ungebremsen Fahrt resultiert durch eine Bremsung zunächst eine Schwellphase, in welcher der Verzögerungsaufbau beginnt. Gefolgt wird diese von einer Phase, in der eine konstante Verzögerung auf das Fahrzeug wirkt. Diese zwei Zustände stellen sich sowohl bei einer Fahrerbremsung mit und ohne Unterstützung des Bremsassistenten als auch bei einer autonom eingeleiteten Verzögerung ein. Auf Grund dieser Tatsache erfolgt die Modellbildung der beiden nachfolgend betrachteten Aktoren, Bremsassistent und autonomes Bremssystem, unter Berücksichtigung des grundlegenden Bremsmodells nach Abbildung 4-11 und einer entsprechenden Adaption an den jeweiligen Anwendungsfall.

4.4.3.1 Modellbildung des Bremsassistenten

Ein nicht ausreichend starkes oder zögerliches Bremsverhalten von Normalfahrern in Notbremssituationen zeigt sich in diversen Untersuchungen an Fahrsimulatoren oder in Realversuchen [HARA 1998], [ZOMOTOR 1991, S.333], [UNSELT 2004], [KIESEWETTER 1997]. Aus diesem Grund wurde der sogenannte Bremsassistent (BAS) entwickelt. Dieser detektiert den Notbremswunsch des Fahrers und erhöht den Bremsdruck über das vom Fahrer vorgegebene Maß, so dass eine optimale Verzögerung und ein möglichst kurzer Bremsweg erreicht wird [HEIBING 2007]. Die Verläufe von Verzögerung, Geschwindigkeit und Bremsweg mit und ohne Aktivierung eines Bremsassistenten verdeutlicht Abbildung 4-23.

Fahrversuche nach [HARA 1998] zeigen, dass unabhängig von der Erfahrung der Testpersonen ein signifikanter Unterschied in der Bremspedalbetätigungsgeschwindigkeit in Normal- und Notbremssituationen zu erkennen ist. Der Effekt einer höheren Betätigungs-geschwindigkeit stellt sich zu Beginn der Bremsung in einer Notsituation sowohl für geübte als auch ungeübte Fahrer ein. Weiter resultiert die Erkenntnis, dass über die Pedalgeschwindigkeit allein keine Detektion des Notbremswunsches möglich ist, da erhöhte Werte

dieser Größe auch während Normalfahrten auf Autobahnen auftreten. Durch den zusätzlichen Einbezug des Pedalweges und dem daraus resultierenden Bremsdruck können Notbremsituationen von normalen Fahrzuständen unterschieden werden [HARA 1998]. Für eine fahrzeugspezifische Applikation werden oftmals weitere Parameter, wie die Fahrzeuggeschwindigkeit (Abbildung 4-24) oder der Zustand der Bremsanlage herangezogen [LÜCKE 1999]. Eine Übersicht technischer Realisierungsmöglichkeiten von Bremsassistenten im Fahrzeug ist in [HEIBING 2007] bzw. [BREUER 2006] dargestellt.

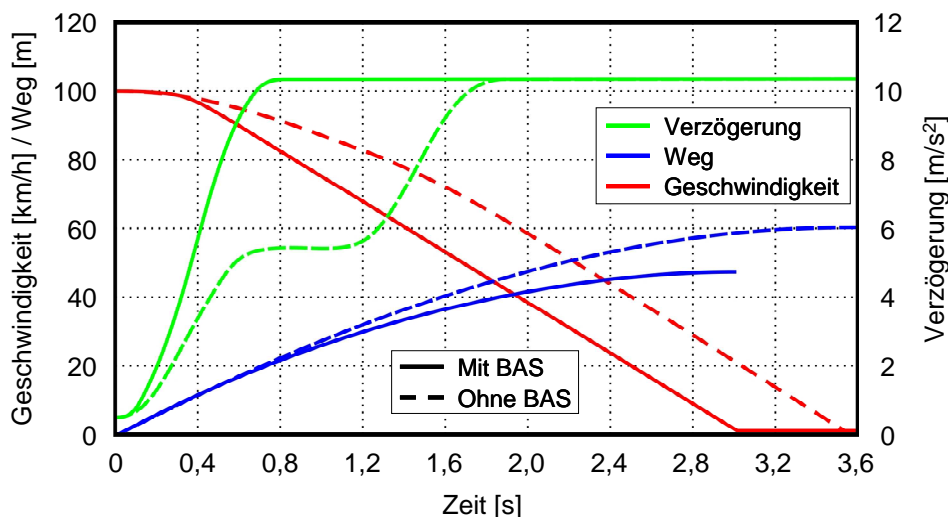


Abbildung 4-23: Verzögerungs-, Geschwindigkeits- und Bremswegverlauf für eine Fahrzeugbremsung mit und ohne Bremsassistent [HEIBING 2007]

Um die Veränderung jeder Unfallsituation durch einen Eingriff des Bremsassistenten in PreEffect-iFGS zu analysieren, wurde sowohl ein Modell zur Detektion der Systemaktivierung durch den Fahrer als auch zur Berechnung der resultierenden Trajektorien der Fahrzeuge entwickelt. Die erste Aufgabe stellt eine besondere Herausforderung dar, weil die Aktivierung des Systems von der Art der Fahrerbremsung bzw. den resultierenden technischen Parametern abhängt, welche in der In-Depth-Datenbank nicht vorhanden sind. Eine Analyse aktueller Modellierungsvarianten des Bremsassistenten in der Literatur zeigt nachfolgend dargelegte Erkenntnisse.

In [HANNAWALD 2003, S. 39ff.] wird unterstellt, dass jeder Fußgängerunfall für den Fahrer eine Notsituation darstellt, so dass die Grenze der Bremspedalgeschwindigkeit auch in jeder gebremsten Kollision überschritten wird. Über den Pedalweg oder Bremsdruck finden sich in der Unfalldatenbank keine Informationen. Daher wird als einzige Größe zur Quantifizierung der Stärke einer Fahrerbremsung die Verzögerung herangezogen. Eine Auslösung des Bremsassistenten erfolgt in [HANNAWALD 2003, S. 39ff.] für alle Unfälle, in denen der Fahrer das Fahrzeug mit einer Verzögerung von mindestens 6 m/s^2 abbremst. Der Anteil an damit ausgewählten Fällen entspricht einer Aktivierungsrate, die sich auch in Fahrsimulatorstudien

nach [UNSELT 2004] zeigte. Die neue Kollisionsgeschwindigkeit wird in [HANNAWALD 2003, S. 39ff.] durch einen analytischen Ansatz unter Anwendung der Gleichungen für eine gleichförmig beschleunigte Bewegung berechnet. Als mittlere Konstantverzögerung wird dabei nicht mehr die ursprüngliche, sondern die maximal erreichbare herangezogen.

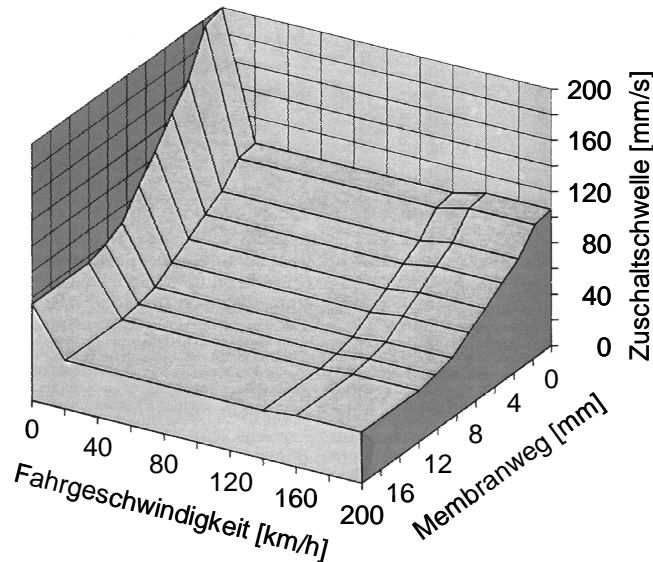


Abbildung 4-24: Auslöseschwellen zur Aktivierung eines Bremsassistenten [KIESEWETTER 1997]

In der Arbeit nach [BUSCH 2005, S. 67ff.] basiert die Auslöseentscheidung auf ähnlichen Größen wie in [HANNAWALD 2003, S. 39ff.]. Eine Wirkung des Systems erfolgt in dieser Arbeit nur für Frontalunfälle, da eine ausreichend hohe Bremspedalgeschwindigkeit des Fahrers nur zu erwarten ist, wenn sich die Gefahr vor dem Fahrzeug befindet. Als zweite Auslöseschwelle wird ebenfalls die Bremsverzögerung herangezogen, wobei ein Grenzwert von mindestens 4 m/s^2 zur Aktivierung angenommen wird. Eine detaillierte Darstellung des Vorgehens zur Berechnung der neuen Kollisionsgeschwindigkeiten bzw. Unfallsituationen erfolgt nicht.

In PreEffect-iFGS wird eine Aktivierung des Bremsassistenten im Wesentlichen nach [HANNAWALD 2003, S. 39ff.] modelliert. Das heißt, es erfolgt die Annahme, dass in jedem gebremsten Unfall eine ausreichend hohe Bremspedalgeschwindigkeit vorliegt, da es sich um eine vom Fahrer erkannte Notsituation handelt. Ferner wird als Ersatzgröße für den Bremsdruck die Bremsverzögerung herangezogen. Das in PreEffect-iFGS verwendete Modell zur Berechnung der veränderten Unfallsituation unterscheidet sich von den bisherigen dadurch, dass der lineare Anstieg der Verzögerung während der Schwellphase im Fahrerbremsmodell (Kapitel 4.3.2) auch bei einer Aktivierung des Bremsassistenten Berücksichtigung erfährt (Abbildung 4-25).

Informationen zur Art der Fahrerbremsung sind in der GIDAS-Datenbank nicht enthalten. Es ist daher nicht bekannt, ob die Einleitung der Verzögerungsphase durch einen Bremschlag oder moderater erfolgte. Aus diesem Grund wird für die Schwellphase bei einer Bremsung mit aktiviertem Bremsassistenten der Mittelwert aus der Literatur von 300 ms beibehalten (Kapitel 4.3.2). Die Berechnung der veränderten Unfallsituationen infolge einer Aktivierung des Bremsassistenten erfolgt zum ursprünglichen Bremszeitpunkt $t_{b,fzg,ges}$ nach Gl. 4-4 und ist durch eine Schwellzeit t_s von 300 ms, innerhalb welcher sich die unfallindividuelle maximal erreichbare Konstantverzögerung a_{max} linear aufbaut, eindeutig definiert. Für eine Implementierung in PreEffect-iFGS wird der Verzögerungsverlauf nach Abbildung 4-25 zum Zeitpunkt der Bremsung als Eingangsgröße an die Softwareumgebung nach [DSD 2009] übergeben und der Effekt der Bremsung auf das jeweilige Unfallszenario berechnet. Generell besteht die Möglichkeit, das Modell über die Schwellzeit beliebig zu parametrisieren, so dass eine Reduktion der Schwellzeit durch den Bremsassistenten selbst oder andere Funktionen, wie eine Vorbefüllung der Bremsanlage, berücksichtigt werden kann. Die maximal erreichbare Verzögerung a_{max} ist den Szenarien unfallindividuell hinterlegt (Kapitel 4.3).

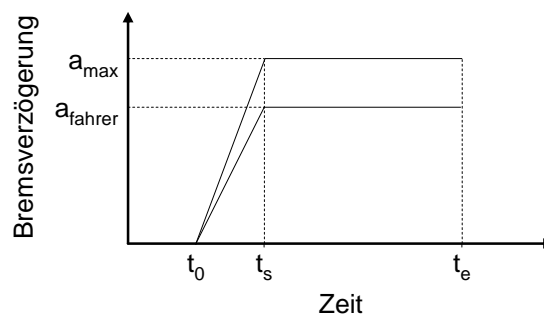


Abbildung 4-25: Verzögerungsverlauf zur Modellierung des Bremsassistenten in PreEffect-iFGS

Eine Betrachtung der Ausführungen nach [HARA 1998] zum Bremsverhalten von ungeübten Fahrern zeigt, dass die maximale Pedalkraft bei ungeübten Fahrern in Notsituationen etwa zwei Drittel unter derjenigen von geübten Fahrern liegt und die Bremskraft bei den ungeübten Fahrern im Verlauf der Bremsung nachlässt. Theoretisch besteht damit die Möglichkeit, dass bereits zu Beginn der Bremsung der benötigte Bremsdruckgradient und Bremsdruck überschritten wird. Da nach dieser Argumentation eine prinzipielle Auslösung des Bremsassistenten in allen gebremsten Fällen besteht, kann zur Ermittlung der Auslöseentscheidung auch ein wahrscheinlichkeitsbasierter Ansatz herangezogen werden. Für diesen Modellierungsansatz erfolgt durch die Vorgabe einer Aktivierungsrate eine zufällige Auswahl von gebremsten Unfällen und eine Berechnung der veränderten Unfallsituation nach Vorgabe des Verzögerungsverlaufes aus Abbildung 4-25.

Eine Aktivierung des Bremsassistenten hängt, wie zuvor dargestellt, vom Fahrerbremsverhalten und den fahrzeugindividuellen Auslöseschwellen ab. Aus diesem Grund wird die Aktivierungsrate in der Regel durch Fahrversuche mit Probanden ermittelt. Ein Beispiel hierfür stellt die Untersuchung nach [UNSELT 2004] dar. In dieser Studie wurde eine Aktivierung des Bremsassistenten von 47% der Versuchspersonen ermittelt. Eine derartige Information dient sowohl als Eingangsgröße für das deterministische Aktivierungsmodell, in welchem die Auswahl der Einzelunfälle für eine angenommene Aktivierung des Bremsassistenten durch die Vorgabe eines Verzögerungsgrenzwertes erfolgt als auch für das wahrscheinlichkeitsbasierte Modell. Folglich werden reale Testergebnisse zur Auslösung eines Bremsassistenten in PreEffect-iFGS über empirisch ermittelte Aktivierungsraten berücksichtigt.

4.4.3.2 Modellbildung des autonomen Bremssystems

Für erweiterte Fahrerassistenz- und Sicherheitsfunktionen werden zunehmend autonome Bremssysteme eingesetzt [BOSCH 2003, S.833]. Die Betätigung der Bremse erfolgt dabei nicht mehr durch den Fahrer, sondern automatisch über ein elektronisches Bremsenmanagement. Die Entscheidung zur Aktivierung des Bremssystems trifft der Funktionsalgorithmus (Kapitel 4.4.2), auf Basis von Informationen über den Fahrzeugeigenzustand und der Umgebung. Autonome Bremssysteme werden für die Erzeugung von verschiedenen Effekten herangezogen. Beispielsweise für die Einleitung einer Teilbremsung mit 40% der maximalen Bremsleistung oder Vollverzögerung [BOGENRIEDER 2009]. Auch für das autonom agierende Bremssystem bildet das Modell aus Abbildung 4-11 die Grundlage, welches sich aus den zwei bekannten Verzögerungsphasen zusammensetzt. Dessen Adaption, zur Modellierung eines autonomen Bremssystems in PreEffect-iFGS, zeigt Abbildung 4-26.

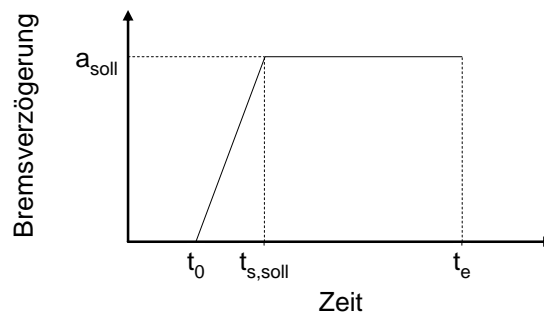


Abbildung 4-26: Verzögerungsverlauf zur Modellierung eines autonomen Bremssystems in PreEffect-iFGS

Für eine mathematische Beschreibung des Verzögerungsverlaufs ist der Referenzverzögerungsgradient grad_{ref} (Gl. 4-6) maßgeblich, auf dessen Berechnung im weiteren Verlauf des Kapitels eingegangen wird.

$$\text{grad}_{\text{ref}} = \frac{a_{\text{ref}}}{t_{\text{s,ref}}} \quad \text{Gl. 4-6}$$

mit grad_{ref} = Referenzverzögerungsgradient
 a_{ref} = Referenzkonstantverzögerung
 $t_{\text{s,ref}}$ = Referenzschwellezeit

Durch diesen und einer zu erzielenden Sollkonstantverzögerung a_{soll} erfolgt eine Bestimmung der benötigten Sollschwellezeit $t_{\text{s,soll}}$ (Abbildung 4-26) nach Gl. 4-7.

$$t_{\text{s,soll}} = \frac{a_{\text{soll}}}{\text{grad}_{\text{ref}}} \quad \text{Gl. 4-7}$$

mit $t_{\text{s,soll}}$ = Sollschwellezeit
 a_{soll} = Sollkonstantverzögerung
 grad_{ref} = Referenzverzögerungsgradient

Ähnlich dem Modell des Bremsassistenten (Kapitel 4.4.3.1) definieren Sollschwellezeit $t_{\text{s,soll}}$, Sollkonstantverzögerung a_{soll} und die Dauer des Bremsvorgangs (t_0 bis t_e) den Verzögerungsverlauf des Fahrzeuges eindeutig. Folglich bilden diese drei Werte die Eingangsparameter in die verwendete Softwareumgebung nach [DSD 2009], um die veränderte Kollisionssituation infolge des autonomen Bremsengriffs zu berechnen.

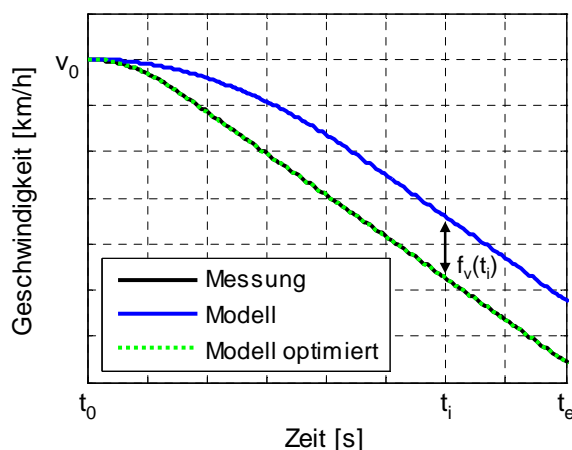


Abbildung 4-27: Geschwindigkeit-Zeit-Verlauf eines Fahrzeugs nach Aktivierung eines autonomen Bremssystems

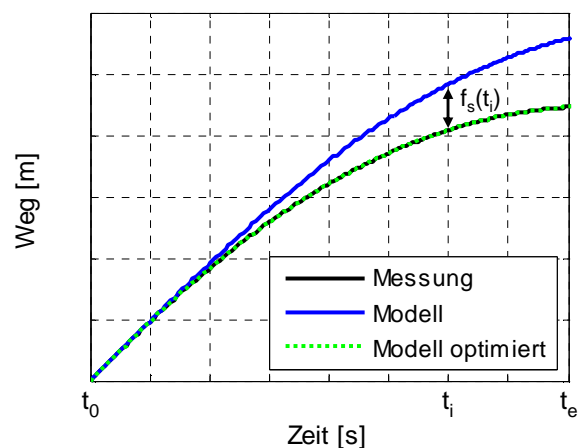


Abbildung 4-28: Weg-Zeit-Verlauf eines Fahrzeugs nach Aktivierung eines autonomen Bremssystems

Ferner macht Gl. 4-7 deutlich, dass der Verzögerungsgradient ein Maß für die Leistungsfähigkeit des Bremssystems darstellt, da mit steigenden Werten die Schwellzeit zum Erreichen einer definierten Konstantverzögerung sinkt. Der Aufbau des Bremsdrucks erfolgt bei autonomen Bremssystemen in der Regel durch hydraulische Komponenten [BOSCH 2003, S. 833], so dass die Verzögerungsphase über eine Maschine eingeleitet wird. Die Leistungsfähigkeit derartiger Systeme ist damit sehr gut durch einen realen Fahrzeugtest oder in den frühen Entwicklungsphasen durch SiL- oder HiL-Simulationen quantifizierbar. Abbildung 4-27 und Abbildung 4-28 zeigen diesbezüglich exemplarische Messergebnisse einer automatischen Vollverzögerung auf Hochreibwert, ausgedrückt durch den Geschwindigkeits-Zeit- und Weg-Zeit-Verlauf. Unter Berücksichtigung dieser Versuchsergebnisse wird nachfolgend das Vorgehen zur Bestimmung eines entsprechenden Referenzverzögerungsgradienten für die Parametrisierung des Modells nach Gl. 4-7 bzw. Abbildung 4-26 erläutert. Der Geschwindigkeits- bzw. Wegverlauf der Messungen lässt sich allgemein nach Gl. 4-8 bzw. Gl. 4-9 beschreiben.

$$v_{\text{modell}}(t) = \begin{cases} v_0 - \frac{1}{2} \cdot \text{grad}_{\text{ref}} \cdot t^2 & t_0 \leq t \leq t_s \\ v_0 - \frac{1}{2} \cdot \text{grad}_{\text{ref}} \cdot t_{s,\text{ref}}^2 - a_{\text{ref}} \cdot t & t_s < t \leq t_e \end{cases} \quad \text{Gl. 4-8}$$

$$s_{\text{modell}}(t) = \begin{cases} v_0 \cdot t - \frac{1}{6} \cdot \text{grad} \cdot t^3 & t_0 \leq t \leq t_s \\ v_0 \cdot t_{s,\text{ref}} - \frac{1}{6} \cdot \text{grad}_{\text{ref}} \cdot t_{s,\text{ref}}^3 + v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot \text{grad} \cdot t_{s,\text{ref}}^2 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a_{\text{ref}} \cdot t^2 & t_s < t \leq t_e \end{cases} \quad \text{Gl. 4-9}$$

- mit v_{modell} = Geschwindigkeitsverlauf Modell
 s_{modell} = Bremswegverlauf Modell
 grad_{ref} = Referenzverzögerungsgradient
 v_0 = Ausgangsgeschwindigkeit
 a_{ref} = Referenzkonstantverzögerung
 $t_{s,\text{ref}}$ = Referenzschwellzeit
 t = Zeit

Die Gleichungen leiten sich aus einem Verzögerungsverlauf mit linearem Aufbau der Verzögerung während der Schwellzeit und Konstantbremsniveau ab, wobei die beiden Verzögerungsphasen separat zu betrachten sind. Es ist zu erkennen, dass die Gleichungen von

den Parametern Ausgangsgeschwindigkeit der Messung v_0 , Referenzschwellzeit $t_{s,ref}$ und Referenzkonstantverzögerung a_{ref} bzw. dem daraus resultierenden Verzögerungsgradienten $grad_{ref}$ (Gl. 4-6) abhängen. Die Ausgangsgeschwindigkeit zu Beginn der Messung ist bekannt (Abbildung 4-27), so dass folglich eine Referenzschwellzeit $t_{s,ref}$ und eine Referenzkonstantverzögerung a_{ref} zu bestimmen sind, welche den Geschwindigkeits-Zeit- bzw. Weg-Zeit-Verlauf bestmöglich approximieren. Daraus resultiert ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Messergebnisse nach Abbildung 4-27 bzw. Abbildung 4-28 und folglich ein entsprechender Referenzverzögerungsgradient $grad_{ref}$, welcher die Leistungsfähigkeit des autonomen Bremssystems quantifiziert. Durch diesen erfolgt eine individuelle Parametrisierung des Bremsmodells nach Gl. 4-7 und Implementierung in PreEffect-iFGS.

Bei der dabei zu lösenden Aufgabe handelt es sich um ein nichtlineares Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen, welches allgemein nach Gl. 4-10 formuliert wird [ALT 2002, S. 246].

$$\min_x f(x) \quad \text{Nb. } g(x) \leq r \quad \text{Gl. 4-10}$$

mit $f(x)$ = Zielfunktion

$g(x)$ = Nebenbedingung

Eine Adaption von Gl. 4-10 an den hier vorliegenden Anwendungsfall führt zu Gl. 4-11. Die Optimierungsaufgabe besteht folglich in der Identifikation einer Parameterkombination von a_{ref} und $t_{s,ref}$, welche die Zielfunktion $f(a_{ref}, t_{s,ref})$, unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen $g_{a,ref}$ und $g_{t_{s,ref}}$, minimiert.

$$\min_{a_{ref}, t_{s,ref}} f(a_{ref}, t_{s,ref}) \quad \text{Nb. } g_{a_{ref}} \leq 0 \quad \text{Gl. 4-11}$$

$$g_{t_{s,ref}} \leq 0$$

mit $f(a_{ref}, t_{s,ref})$ = Zielfunktion in Abhängigkeit von a_{ref} und $t_{s,ref}$

$g_{a_{ref}}$ = Nebenbedingung für a_{ref}

$g_{t_{s,ref}}$ = Nebenbedingung für $t_{s,ref}$

Die Zielfunktion $f(a_{ref}, t_{s,ref})$ beschreibt den Gesamtfehler zwischen dem Resultat einer Modellparametrisierung durch die Größen a_{ref} bzw. $t_{s,ref}$ und der Messung für den Geschwindigkeits- und Bremswegverlauf. Diese Abweichung setzt sich zusammen aus den summierten Fehlerquadraten zwischen Modell und Messung über alle Zeitinkremente $t_0 \leq t_i \leq t_e$ (Gl. 4-12).

$$f(a_{\text{ref}}, t_{\text{s,ref}}) = \sum_{i=0}^e (v_{\text{modell}}(t_i, a_{\text{ref}}, t_{\text{s,ref}}) - v_{\text{messung}}(t_i))^2 + \sum_{i=0}^e (s_{\text{modell}}(t_i, a_{\text{ref}}, t_{\text{s,ref}}) - s_{\text{messung}}(t_i))^2$$

Gl. 4-12

mit v_{modell} = Geschwindigkeitsverlauf Modell
 s_{modell} = Bremswegverlauf Modell
 v_{messung} = Geschwindigkeitsverlauf Messung
 s_{messung} = Bremswegverlauf Messung
 a_{ref} = Referenzkonstantverzögerung
 $t_{\text{s,ref}}$ = Referenzschwellezeit
 t_i = Zeitpunkt

Zur graphischen Veranschaulichung ist die Zielfunktion $f(a_{\text{ref}}, t_{\text{s,ref}})$ für ausgewählte Kombinationen von Referenzkonstantverzögerung und -schwellezeit in Abbildung 4-29 logarithmisch dargestellt. Ferner zeigen Abbildung 4-27 und Abbildung 4-28 neben den Messergebnissen die Modellverläufe für eine exemplarische Parameterkombination a_{ref} und $t_{\text{s,ref}}$ und den daraus resultierenden Fehler für den Geschwindigkeitsverlauf $f_v(t_i)$ und Bremswegverlauf $f_s(t_i)$ zwischen Modell und Messung für einen Zeitpunkt t_i .

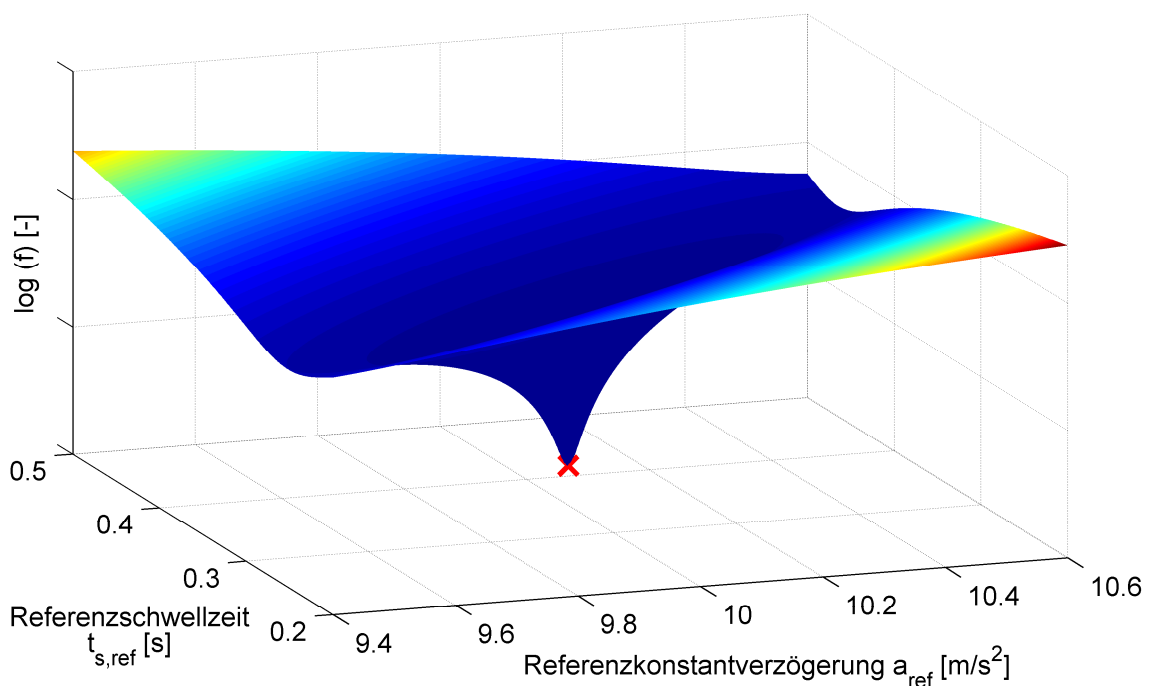


Abbildung 4-29: Zielfunktion für ausgewählte Kombinationen von Referenzkonstantverzögerung a_{ref} und Referenzschwellezeit $t_{\text{s,ref}}$

Als Nebenbedingung $g_{a,ref}$ und $g_{ts,ref}$ erfolgt eine Definition von zwei Untergrenzen $a_{ref,ug}$ und $t_{s,ref,ug}$ für die Wertebereiche von Referenzkonstantverzögerung und -schwellezeit. Auf Grund des Vorwissens, dass die Messkurven aus Bremsversuchen stammen, wird festgelegt, dass die Verzögerung nur Werte größer null annehmen darf. Die entsprechende Formulierung der Nebenbedingung $g_{a,ref}$ erfolgt nach Gl. 4-13.

$$g_{a,ref} = a_{ref,ug} - a_{ref} \leq 0 \quad \text{mit} \quad 0 < a_{ref,ug} \leq a_{ref} \quad \text{Gl. 4-13}$$

mit $g_{a,ref}$ = Nebenbedingung Referenzkonstantverzögerung
 a_{ref} = Referenzkonstantverzögerung
 $a_{ref,ug}$ = Untergrenze der Referenzkonstantverzögerung

Die Definition des Verzögerungsgradienten $grad_{ref}$ nach Gl. 4-8 macht deutlich, dass der Wertebereich der Referenzschwellezeit $t_{s,ref}$ auf Ausprägungen größer als Null einzuschränken ist. Die korrespondierende Nebenbedingung $g_{ts,ref}$ ist in Gl. 4-14 dargestellt.

$$g_{ts,ref} = t_{s,ref,ug} - t_{s,ref} \leq 0 \quad \text{mit} \quad 0 < t_{s,ref,ug} \leq t_{s,ref} \quad \text{Gl. 4-14}$$

mit $g_{t,ref}$ = Nebenbedingung Referenzschwellezeit
 $t_{s,ref}$ = Referenzschwellezeit
 $t_{s,ref,ug}$ = Untergrenze Referenzschwellezeit

Die Lösung des nichtlinearen Optimierungsproblems nach Gl. 4-11 erfolgt durch das Verfahren der sequentiellen quadratischen Programmierung (SQP). Dieses ist nach [ALT 2002, S.246ff.] zur numerischen Lösung nichtlinearer Probleme mit Ungleichungsrestriktionen am besten geeignet. Auch nach [GEIGER 2002, S.234ff.] stellen die SQP-Verfahren die wichtigste Klasse zur Lösung allgemeiner nichtlinearer Optimierungsaufgaben dar. Das resultierende quadratische Problem wird durch die Aktive-Mengen-Methode [ALT 2002, S.229ff.], [GEIGER 2002, S.199ff.] unter Anwendung der Softwareimplementierung nach [MATLAB 2009] gelöst.

Die Berechnungsergebnisse zeigt Abbildung 4-30. Daraus ist ersichtlich, dass die Messungen aus Abbildung 4-27 bzw. Abbildung 4-28 durch ein lineares Bremsmodell nach Gl. 4-8 bzw. Gl. 4-9 mit einer Referenzkonstantverzögerung von $a_{ref} = 10,0160 \text{ m/s}^2$ und Referenzschwellezeit von $t_{s,ref} = 0,3636 \text{ s}$ am besten approximiert werden. Daraus resultiert ein Verzögerungsgradient von $grad_{ref} = 27,5504 \text{ m/s}^3$. Eine Betrachtung des arithmetischen Mittels der Abweichungen zwischen Modell und Messung für den Geschwindigkeits- bzw. Bremswegverlauf zeigt Werte von $\bar{f}_v = -0,0163 \text{ km/h}$ bzw. $\bar{f}_s = 0,0058 \text{ m}$. Die

korrespondierenden Standardabweichungen berechnen sich zu $\sigma_{fv} = 0,0347$ km/h und $\sigma_{fs} = 0,0021$ m und weisen analog den mittleren Abweichungen äußerst geringe Werte auf. Die graphische Plausibilisierung der berechneten Ergebnisse in Abbildung 4-27 und Abbildung 4-28 zeigt eine sehr gute Annäherung der Geschwindigkeits- und Bremswegverläufe des Modells an die Messergebnisse. Eine visuelle Abweichung zwischen beiden Kurven ist nicht zu erkennen. Zusätzlich ist das berechnete Optimum in die Darstellung der Zielfunktion eingezeichnet (Abbildung 4-29).

| a_{ref} [m/s ²] | $t_{s,ref}$ [s] | $grad_{ref}$ [m/s ³] | \bar{f}_v [km/h] | σ_{fv} [km/h] | \bar{f}_s [m] | σ_{fs} [m] |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|
| 10,0160 | 0,3636 | 27,5504 | -0,0163 | 0,0347 | 0,0058 | 0,0021 |

Abbildung 4-30: Berechnungsergebnisse zur Quantifizierung der Modellannäherung an die realen Messergebnisse durch Lösen des nichtlinearen Optimierungsproblems

Die zuvor aufgeführten Resultate der Berechnung machen deutlich, dass mit dem vorgestellten Verfahren eine Ermittlung von spezifischen Referenzverzögerungsgradienten für unterschiedliche Bremssysteme auf Basis realer Messergebnisse erfolgt. Folglich wird durch diese die Leistungsfähigkeit verschiedener autonomer Bremssysteme für eine Berechnung der Feldeffektivität in PreEffect-iFGS quantifizierbar, indem ein entsprechender Referenzverzögerungsgradient für eine Parametrisierung des in Gl. 4-7 bzw. Abbildung 4-26 dargestellten Bremsmodells verwendet wird.

4.4.3.3 Modellbildung der Systemkombination aus Bremsassistent und autonomen Bremssystem

Eine Betrachtung des Fußgängerunfallgeschehens hinsichtlich des Bremsverhaltens der Fahrzeugführer zeigt, dass zwei Fälle zu unterscheiden sind (Abbildung 2-10). Zum einen existieren gebremste Unfälle, in denen der Fahrer die drohende Kollision erkennt und selbstständig eine Bremsung einleitet. Zum anderen treten ungebremste Unfälle auf, in welchen die Konfliktsituation ohne eine vorkollisionäre Verzögerung stattfindet. Wie in Kapitel 4.4.3.1 beschrieben, handelt es sich beim Bremsassistenten um ein System, welches vom Fahrer ausgelöst wird. Aus diesem Grund ist die generelle Wirkungsweise des Bremsassistenten auf gebremste Unfälle begrenzt, wobei eine Auslösung erst erfolgt, wenn definierte Auslöseschwellen überschritten werden. Im Gegensatz zum Bremsassistenten liegen sowohl gebremste als auch ungebremste Unfälle innerhalb des Wirkungsfeldes eines autonomen Bremssystems, so dass in diesen Kollisionstypen eine Wirkungsfeldüberschneidung der beiden Systeme möglich ist.

Um die Feldeffektivität aus einer Kombination von Bremsassistent und autonomen Bremssystem zu berechnen, sind daher die in Abbildung 4-31 dargestellten drei Fälle zu unterscheiden und in PreEffect-iFGS individuell abzubilden. Für die nachfolgenden Erläuterungen wird zugrunde gelegt, dass sich das Fahrerverhalten durch die Ausstattung des Fahrzeugs mit einem integralen Sicherheitssystem nicht verändert. Es wird daher angenommen, dass in einem ungebremsten Unfall nach Einleitung des autonomen Bremsengriffs keine veränderte Fahrerreaktion resultiert, beispielsweise in Form einer zusätzlich eingeleiteten Verzögerung oder eines Lenkeingriffs durch den Fahrzeugführer. Ferner erfolgt die Annahme, dass durch den autonomen Bremsengriff eine Notbremsung ausgelöst wird und der Fahrer im ursprünglichen Unfall mit einer Verzögerung a_{fahrer} bremsst, welche unterhalb der maximal erreichbaren Verzögerung a_{max} liegt. Für den Fall 1 aus Abbildung 4-31 stellt sich die Implementierung eines autonomen Bremsengriffs analog Abbildung 4-26 dar. Das bedeutet, sobald der Funktionsalgorithmus ein Signal zur Auslösung der Bremse ausgibt, erfolgt die Einleitung der Verzögerungsphase mit einem definierten Referenzverzögerungsgradienten bis zu einer Konstantverzögerung.

| Fall | Unfallart | Bremsassistent | Autonomes Bremssystem |
|------|--|-------------------|-----------------------|
| 1 | Ungebremste Unfälle | Kein Wirkungsfeld | Wirkfeld |
| 2 | Gebremste Unfälle (ohne BAS-Aktivierung) | Kein Wirkungsfeld | Wirkfeld |
| 3 | Gebremste Unfälle (mit BAS-Aktivierung) | Wirkfeld | Wirkfeld |

Abbildung 4-31: Wirkungsfeldbetrachtung der Systeme Bremsassistent und autonomes Bremssystem in Abhängigkeit des Bremsverhaltens der Fahrzeugführer

Für den Fall 2 aus Abbildung 4-31 sind zwei Varianten zu betrachten. Zum einen besteht die Möglichkeit, dass das autonome Bremssystem vor dem Fahrereingriff aktiviert wird (Abbildung 4-32). Hier entspricht die Implementierung des automatischen Bremsengriffs der von Fall 1 und die später einsetzende Fahrerbremsung hat keinen Einfluss mehr auf die Berechnung. Erfolgt zum anderen eine Aktivierung des autonomen Bremssystems und der Fahrer bremsst bereits, wird die Interaktion nach Abbildung 4-33 modelliert. Diese zeigt, dass zum Aktivierungszeitpunkt des autonomen Bremssystems t_{anb} die Fahrerverzögerung bis zum Erreichen des maximalen Verzögerungsniveaus a_{max} überlagert wird, wobei ein Verlassen des Fahrerbremsverlaufs mit dem entsprechendem Referenzverzögerungsgradienten des autonomen Bremssystems erfolgt. Diese Überlagerung erfolgt sowohl während der Schwell- (t_{anb1}) als auch Konstantbremsphase (t_{anb2}) der Fahrerverzögerung.

Der Fall 3 aus Abbildung 4-31 stellt eine Wirkfeldüberschneidung dar, in welchem die Möglichkeit besteht, dass sowohl der Bremsassistent als auch ein autonomes Bremssystem auf die Unfallsituation Einfluss nehmen. Eine Modellbildung dieser Variante folgt der Gesetzmäßigkeit, dass das zuerst aktivierte System nicht mehr übersteuert wird. Aus einer zeitlich vorgelagerten Aktivierung des autonomen Bremssystems resultiert daher, dass keine spätere Auslösung des Bremsassistenten mehr erfolgt (Abbildung 4-34). Ebenso verhält es sich, wenn der Bremsassistent vor dem autonomen Bremssystem aktiviert wird. In diesem Fall beeinflusst das autonome Bremssystem den Unfallablauf nicht mehr (Abbildung 4-35). Zur Veranschaulichung der Effekte aus diesem Modellierungsvorgehen sind in Abbildung 4-34 bzw. Abbildung 4-35 zusätzlich die Verzögerungsverläufe des Bremsassistenten und des autonomen Bremssystems dargestellt (strichpunktierte Linien), welche sich ergeben könnten, wenn das zuvor erläuterte Prinzip nicht gilt.

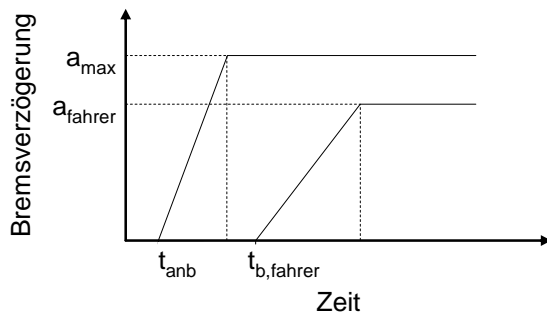


Abbildung 4-32: Aktivierung eines autonomen Bremssystems vor einer Fahrerbremsung

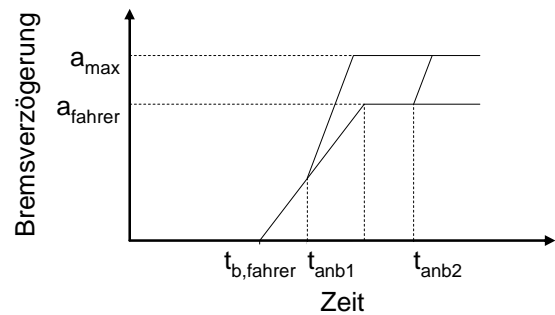


Abbildung 4-33: Aktivierung eines autonomen Bremssystems während einer Fahrerbremsung

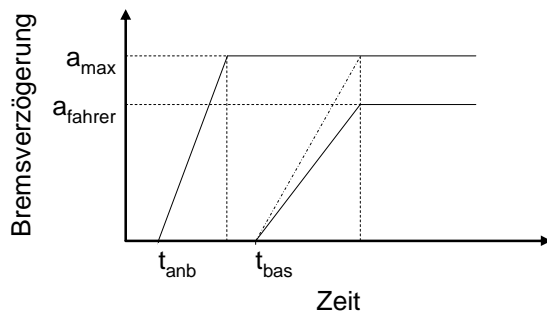


Abbildung 4-34: Aktivierung eines autonomen Bremssystems vor einer Fahrerbremsung mit Aktivierung des Bremsassistenten

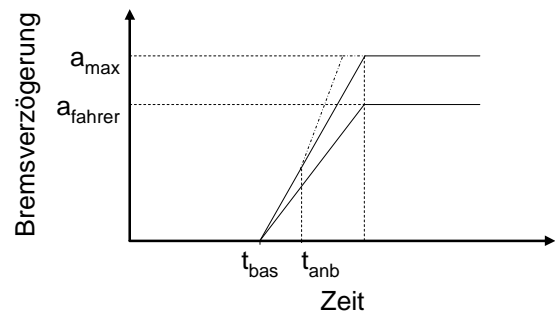


Abbildung 4-35: Aktivierung eines autonomen Bremssystems während einer Fahrerbremsung mit Aktivierung des Bremsassistenten

4.5 Berechnung der veränderten Unfallsituationen

Die Integration von Modellen der aktiven Systemkomponenten in die Bewertungsmethode erfolgte durch den Einsatz von zwei übergeordneten Simulationsverfahren, welche als PreEffect-Open-Loop und -Closed-Loop bezeichnet werden und das Softwareprogramm nach [DSD 2009] ansteuern. Die Prozessschritte, wie eine Auswertung der Simulationsrohdaten im Sensormodell, Übergabe von Objektlisten an den Funktionsalgorithmus, Berechnung des Aktivierungszeitpunktes und die Vorgabe eines Verzögerungsverlaufes zur Analyse der Auswirkungen von Bremsaktoren auf die ursprüngliche Kollisionssituation erfolgen in diesen beiden Verfahren. Die Open-Loop-Variante charakterisiert sich dadurch, dass Fahr-situationen vorab simuliert und folglich zeiteffizient ausgewertet werden [SCHRAMM 2009B]. Durch PreEffect-Closed-Loop erfolgt eine Simulation des Gesamtsystemzustands im geschlossenen Regelkreis, woraus eine hohe Prognosegüte resultiert.

4.5.1 Gesamtsystemsimulation im offenen Regelkreis

Die Open-Loop-Simulation ist durch zwei unabhängig voneinander durchzuführende Prozessschritte charakterisiert (Abbildung 4-36). In einem Pre-Processing erfolgt die Erzeugung einer Ergebnisdatenbank. In diesem Schritt werden die Effekte von Aktorauslösungen auf die Einzelunfallszenarien der Datenbasis simuliert und archiviert. Im nachfolgenden Schritt des Post-Processings erfolgt eine Auswertung der vorberechneten Ergebnisse unter Berücksichtigung der Modelle von Sensorik und Funktionsalgorithmus und eine Ermittlung der veränderten Unfallsituationen. Der Schritt des Pre-Processings ist daher unabhängig von der Auslösestrategie des Sicherheitssystems und dient der reinen Datenerzeugung.

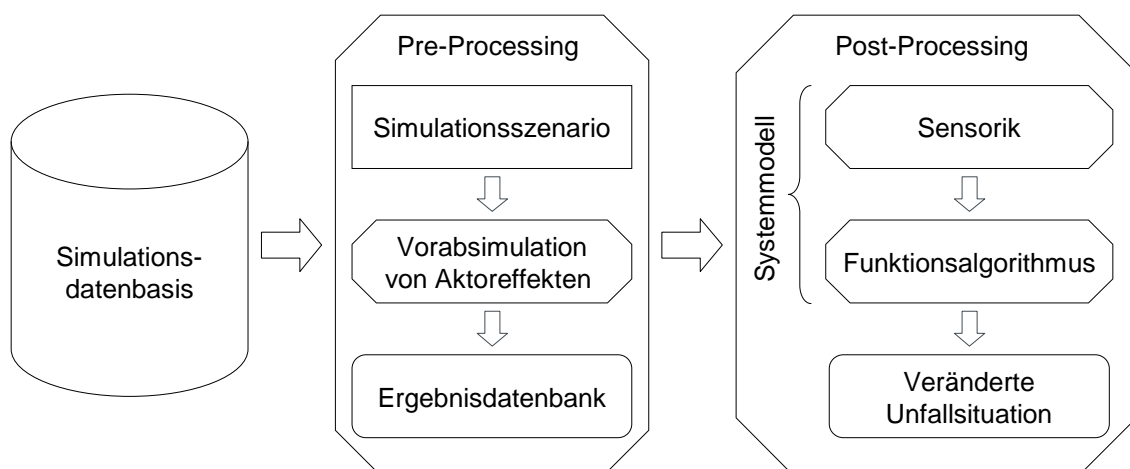


Abbildung 4-36: Prozessschritte von PreEffect-Open-Loop zur Ermittlung der veränderten Unfallsituationen

4.5.1.1 Vorabsimulation der Auswirkungen von Aktoreingriffen

Eine Ermittlung der veränderten Unfallsituationen durch PreEffect-Open-Loop erfordert im ersten Schritt die Erzeugung einer Ergebnisdatenbank. Die dafür durchzuführenden Schritte werden nachfolgend an dem exemplarischen Anwendungsfall, die Auswirkungen einer Notbremsung auf das Fußgängerunfallgeschehen zu analysieren, erläutert. Grundlage für das Pre-Processing bildet der Verzögerungsverlauf der Fahrzeuge in den ursprünglichen Unfallsituationen. Für ein Fahrzeug ist dieser in Abbildung 4-37 dargestellt. Den daraus resultierenden Geschwindigkeitsverlauf zeigt Abbildung 4-38. Aus Abbildung 4-38 ist ersichtlich, dass sich das Fahrzeug zunächst mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt bis der Fahrer zum Zeitpunkt t_6 eine Bremsung einleitet. Die Verzögerungsphase (t_6 bis t_{10}) reicht nicht aus, um den Anprall des Fußgängers am Fahrzeug zu verhindern, so dass zum Zeitpunkt t_{10} eine Kollision stattfindet.

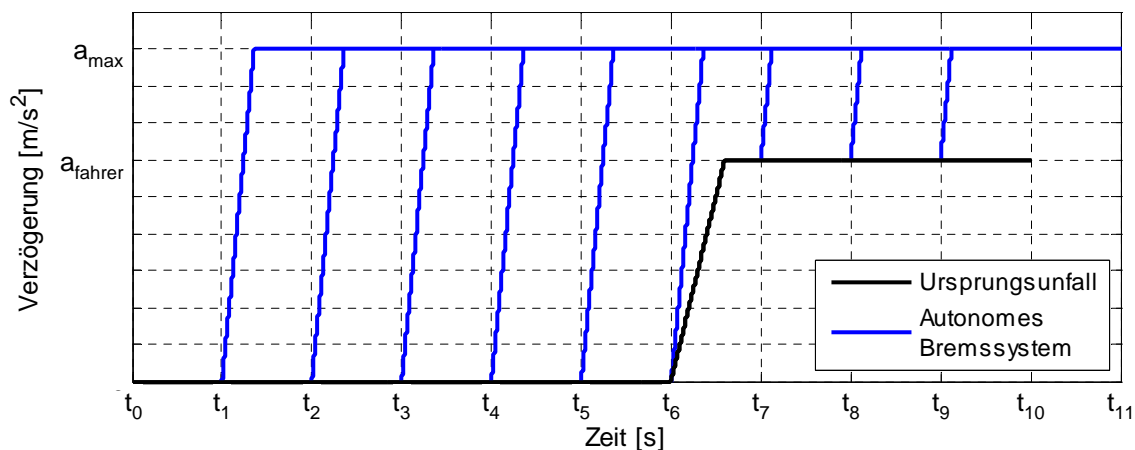


Abbildung 4-37: Verzögerungsverläufe im Ursprungsunfall und infolge der Implementierung von Notbremsungen durch ein autonomes Bremssystem

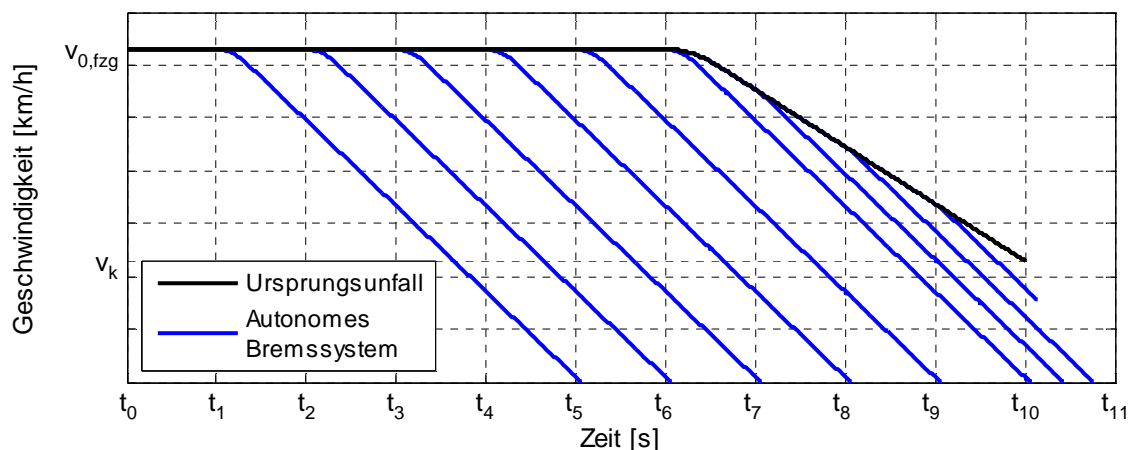


Abbildung 4-38: Geschwindigkeitsverläufe im Ursprungsunfall und infolge der implementierten Notbremsungen durch ein autonomes Bremssystem

Für die Vorabsimulation von Aktoreffekten, das Fahrzeug durch Notbremsungen maximal zu verzögern, wird das ursprüngliche Unfallszenario zu bestimmten Zeitpunkten (t_1 bis t_9) angehalten und über eine definierte Vorausschuldauer die Auswirkungen einer Notbremsung mit einem definierten Verzögerungsgradienten grad_{ref} simuliert (Abbildung 4-37). Startwerte für diese Untersimulationen bilden die jeweils aktuellen Bewegungsgrößen und Objektpositionen des ursprünglichen Unfallszenarios zu den entsprechenden Zeitpunkten. Die Erzeugung der Ergebnisdatenbank resultiert aus der Archivierung definierter Größen im Verlauf des Simulationsvorgangs. Dabei handelt es sich unter anderem um den zeitlichen Verlauf des ursprünglichen Unfallszenarios mit allen Bewegungsgrößen und Positionsdaten von Fahrzeug und Fußgänger. Am Ende der Untersimulationen erfolgt ein Speichervorgang von weiteren Szenarioparametern. Der Endpunkt ist durch zwei Abbruchkriterien festgelegt. Zum einen, wenn innerhalb der Vorausschuldauer eine Kollision zwischen Fahrzeug und Fußgänger stattfindet. Resultiert zum anderen keine Konfliktsituation ist die Untersimulation nach Durchlaufen der Vorausschuldauer beendet. In beiden Fällen erfolgt eine Archivierung der Bewegungs- und Positionsdaten von Fahrzeug und Fußgänger am Simulationsende.

Für eine erste graphische Interpretation der resultierenden Geschwindigkeitsverläufe in Abbildung 4-38 ist zu berücksichtigen, dass es sich bei diesem exemplarisch ausgewählten Unfallszenario um ein einen Fall handelt, welcher dem sensoräquivalenten Unfalltyp 410.98 zugeordnet ist (Abbildung 4-9). Das Besondere an diesem Kollisionstyp ist, dass die Konfliktsituation nicht zeitlich, sondern nur räumlich vermeidbar ist, indem das Fahrzeug auf dem zur Verfügung stehenden Bremsweg zum Stillstand gebracht wird. Die zeitliche Vermeidbarkeit ist dadurch charakterisiert, dass auf Grund des Bremsvorgangs eine Vergrößerung der Zeit bis zur Kollision resultiert und der Fußgänger infolge des Zeitgewinns die Möglichkeit besitzt, sich aus dem Gefahrenbereich zu entfernen. Eine Betrachtung von Abbildung 4-38 zeigt, dass das Fahrzeug bis zum Zeitpunkt t_8 durch den Eingriff eines autonomen Bremssystems zum Stillstand gebracht und die Kollision verhindert wird. Eine Aktivierung des Systems zum Zeitpunkt t_9 führt zu einem Kontakt zwischen Fahrzeug und Fußgänger, welcher mit einer geringeren Kollisionsgeschwindigkeit als im Ursprungsunfall erfolgt. Als Konsequenz resultiert aus einer Aktivierung der Notbremsung zu diesem Zeitpunkt noch eine Minderung der Unfallschwere.

Das zuvor geschilderte Vorgehen des Pre-Processings erfolgt für jedes Unfallszenario innerhalb der Datenbasis und ist für jeden zu untersuchenden Aktoreffekt separat durchzuführen. Für eine Analyse von Notbremsungen mit Systemen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit, Beschränkung der Wirkzeit oder Aktorkombinationen sind folglich separate Ergebnisdatenbanken zu erzeugen. Als Ergebnis des Pre-Processings resultiert folglich die Ergebnisdatenbank, welche für jedes Unfallszenario der Datenbasis zu jedem simulierten Zeitinkrement die Auswirkung der Aktorauslösung auf das ursprüngliche Unfallszenario beinhaltet.

4.5.1.2 Auswertung der Ergebnisdatenbank

Die in Kapitel 4.5.1.1 erläuterten Prozessschritte führen zu einer effektiven Ermittlung der veränderten Unfallsituationen infolge der Fahrzeugausstattung mit einem integralen Sicherheitssystem. Das Auswertevorgehen basiert auf der generierten Ergebnisdatenbank, welche zum einen den zeitlichen Verlauf des ursprünglichen Unfallszenarios mit allen Bewegungs- und Positionsgrößen von Fahrzeug und Fußgänger und zum anderen die Resultate der Aktorauslösungen zu definierten Zeitpunkten beinhaltet. Durch eine Verarbeitung der Zeitreihen der ursprünglichen Szenarien in einem Systemmodell, bestehend aus Sensorik und Funktionsalgorithmus, werden die Auslösezeitpunkte t_{anb} der autonomen Notbremsung unfallindividuell ermittelt (Abbildung 4-39).

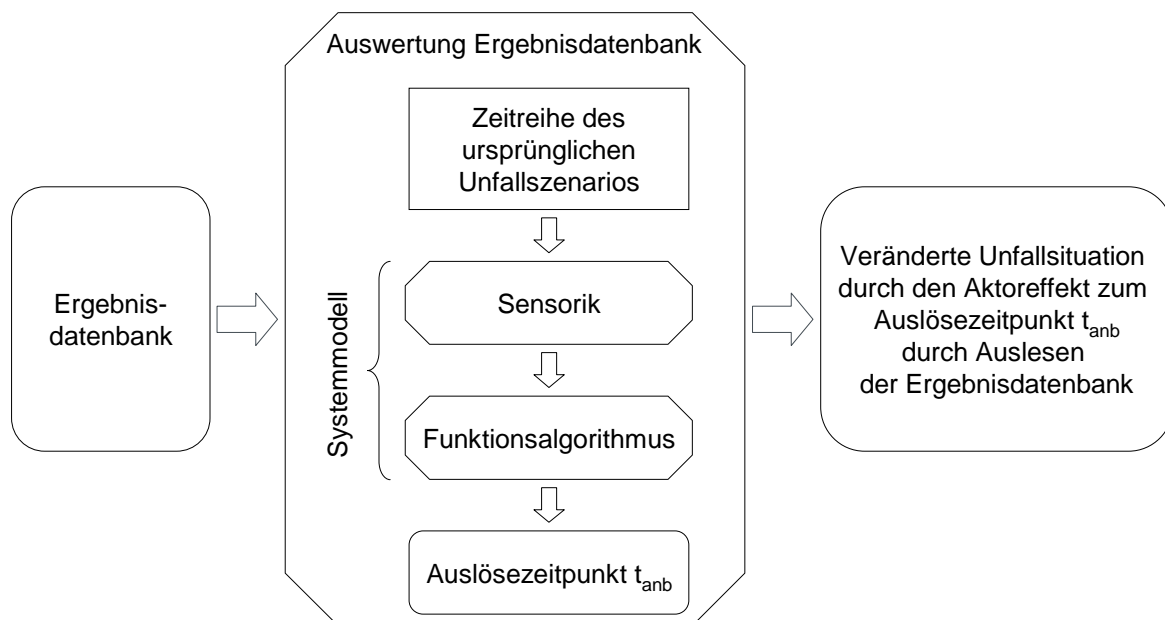


Abbildung 4-39: Prozess zur Auswertung der Ergebnisdatenbank und Bestimmung der veränderten Kollisionssituation mit PreEffect-Open-Loop

Nach deren Bestimmung erfolgt eine Ermittlung der veränderten Konfliktsituationen für den entsprechenden Aktoreffekt durch ein Auslesen der vorsimulierten Ergebnisdatenbank. Abbildung 4-39 macht deutlich, dass es sich bei einer Systembewertung mit PreEffect-Open-Loop um keinen geschlossenen Regelkreis handelt, da die resultierenden Bewegungsverläufe zwischen Fahrzeug und Fußgänger infolge der Aktorauslösung keine erneute Auswertung im Systemmodell erfahren. Nach einer Identifikation des Auslösezeitpunktes ist nur das vorab simulierte Ergebnis des Aktoreingriffs bekannt, für welches keine weiteren Systeminteraktionen berücksichtigt werden. Eine Berechnung möglicher Rückkopplungen auf das Gesamtsystem erfolgt auf Grund des offenen Regelkreises nicht. Die daraus resultierenden Konsequenzen für eine Systembewertung werden in Kapitel 4.5.1.3 erläutert.

Die einfachste Ausprägung eines Systemmodells entspricht einer Aktivierung der Aktorik bei gegebener Zeit vor Kollision. In diesem Fall entfällt die Auswertung der Zeitreihe des ursprünglichen Unfallszenarios im Sensormodell und der Funktionsalgorithmus wird durch die Variante Time-To-Collision oder die Einbindung realer Auslösezeiten aus der Erprobung repräsentiert (Kapitel 4.4.2). Eine Bestimmung der Bewegungs- und Positionsdaten der veränderten Kollisionssituation infolge eines definierten Aktoreffektes erfolgt daher durch ein Auslesen der entsprechenden Parameter aus der Ergebnisdatenbank ohne zusätzlichen Simulationsaufwand. Über diese beiden Anwendungsfälle hinaus werden alle unter Kapitel 4.4 dargestellten Modellausprägungen der aktiven Systemkomponenten in PreEffect-Open-Loop integriert, so dass deren Auswirkungen auf die ursprünglichen Unfallsituationen analysiert werden können.

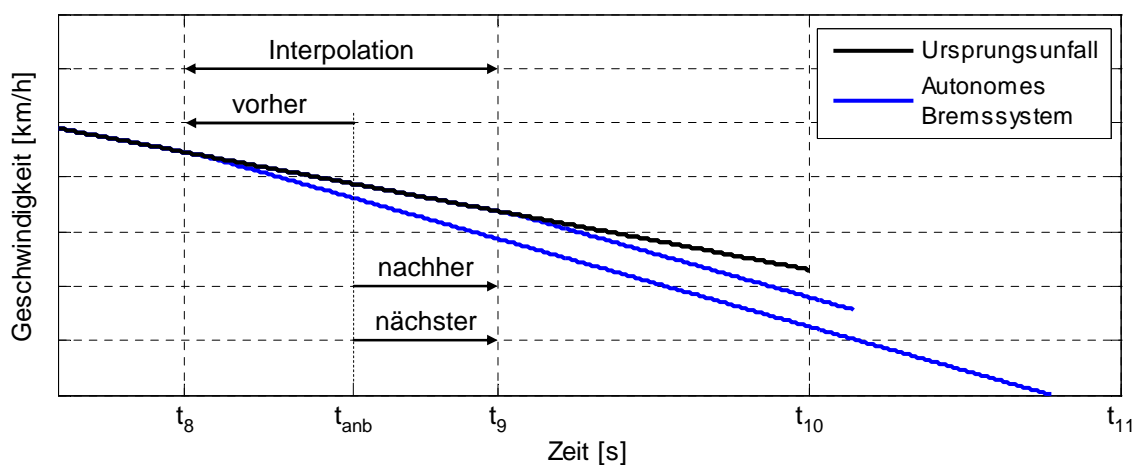


Abbildung 4-40: Zuordnung von Berechnungsergebnissen aus der Ergebnisdatenbank zu einer Auslösezeit t_{anb}

Auf Grund der zeitdiskreten Berechnung von Aktoreffekten besteht die Möglichkeit, dass vom Funktionsalgorithmus ein Auslösezeitpunkt t_{anb} bestimmt wird, welcher zwischen zwei vor-simulierten Ergebnissen liegt (Abbildung 4-40). Bei einer äquidistanten Wahl der Zeitinkremente sowohl für die Archivierung des ursprünglichen Unfallszenarios als auch der Vorabsimulation von Aktoreffekten tritt dieser Fall nicht auf. Die Definition der Zeitinkremente zur Berechnung der Aktoreffekte besitzen entscheidenden Einfluss auf die benötigte Simulationszeit, wobei große Zeitschritte zu einer Reduktion der Rechenzeit führen und umgekehrt. Die Abweichung von einer äquidistanten Definition zur Reduktion des Simulationsaufwandes oder das Einbinden von Auslösezeiten aus dem Realversuch als eine mögliche Ausprägung des Funktionsalgorithmus können dazu führen, dass der Aktionszeitpunkt unter Umständen zwischen zwei vorsimulierten Ergebniswerten liegt. Um in diesem Fall ein Resultat zuzuordnen, existieren vier unterschiedliche Möglichkeiten (Abbildung 4-40). Die ersten drei Varianten charakterisieren sich durch ein Auslesen des Simulationsergebnisses des vorherigen, nachfolgenden oder am nächsten gelegenen Zeitschrittes aus der Ergebnis-

datenbank. Alternativ erfolgt eine Interpolation des Ergebniswertes aus Nachbarwerten. Für eine Interpretation der ermittelten Ergebnisse ist die im Pre-Processing definierte Vorausschauldauer zu beachten. Wie bereits erwähnt, wird die Berechnung von Aktoreffekten beendet, wenn innerhalb der Vorausschauldauer entweder eine Kollision stattfindet oder deren zeitliches Ende erreicht ist. Die erste Abbruchbedingung geht eindeutig aus den Daten hervor, wobei Kollisionen, die nach Stillstand des Fahrzeugs erfolgt sind, nicht als Kollisionen behandelt werden. In diesem Fall läuft der Fußgänger in ein stehendes Fahrzeug. Lässt die Ergebnisdatenbank infolge der zweiten Abbruchbedingung auf keine Kollision schließen, so ist diese nur dann als räumlich oder zeitlich vermieden zu betrachten, wenn sichergestellt ist, dass ein Durchlaufen der Vorausschauldauer und der damit verbundene Simulationsabbruch nicht die Möglichkeit der Entwicklung einer Konfliktsituation in der nahen Zukunft verhindert hat. Dies wird erreicht, indem zur Definition der Vorausschauldauer die erwarteten Auslösezeitpunkte und die zeitliche Länge des Gesamtszenarios berücksichtigt wird.

4.5.1.3 Möglichkeiten und Grenzen von PreEffect-Open-Loop

Der Ansatz von PreEffect-Open-Loop, im Analyseprozess Simulationsrechnungen durch Suchoperationen zu ersetzen, führt zu sehr kurzen Auswertezeiten und einem effizienten Einsatz des Werkzeugs im Entwicklungsprozess. Weiter kann die erzeugte Ergebnisdatenbank für beliebig viele Untersuchungen des gleichen Aktoreffektes wiederverwendet werden. Für das Beispiel in Kapitel 4.5.1.1 bedeutet dies, dass eine Untersuchung der Auswirkungen einer Notbremsung auf das Fußgängerunfallgeschehen für verschiedene Kombinationen von Sensoren und Funktionsalgorithmen erfolgt, ohne die Ergebnisdatenbank neu zu erzeugen. Aus diesem Grund ist der einmalige Prozess zur Datengenerierung, in welchem die Aktoreffekte für mehr Auslösezeitpunkte simuliert werden als für die Analyse einer definierten Systemkombination benötigt, vertretbar.

Neben diesem Vorteil resultieren auf Grund des offenen Regelkreises Einschränkungen bezüglich der bewertbaren Systemausprägungen. Im Pre-Processing erfolgt analog den Ausführungen in Kapitel 4.5.1.1 eine reine Berechnung von Aktoreffekten und deren Archivierung bei Erreichen des Simulationsendes. Eine Betrachtung des veränderten Unfallverlaufes infolge einer simulierten Aktorauslösung zu einem Zeitpunkt (1), in einer schematischen Darstellung der Szenarioparameter über die Zeit, ergibt den Verlauf (1) bis (2) in Abbildung 4-41. Am Punkt (1) führt die Notbremsung zu einem Verlassen der ursprünglichen Unfalltrajektorie und das Ende der Simulation wird zum Zeitpunkt (2) erreicht. Wie in Kapitel 4.5.1.2 erläutert, ist der Effekt einer autonomen Notbremsung nur zum Zeitpunkt (2) bekannt. Es wird daher über die gesamte Vorausschauldauer implizit davon ausgegangen, dass keine Effekte auftreten, welche beispielsweise ein Öffnen der Bremse

hervorrufen. Unter der Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten kann beispielsweise der Szenarienvorlauf (1) bis (3) in Abbildung 4-41 resultieren, aus welchem im Vergleich zu den vorherigen Ausführungen ein anderer Endzustand für die Konfliktsituation resultiert.

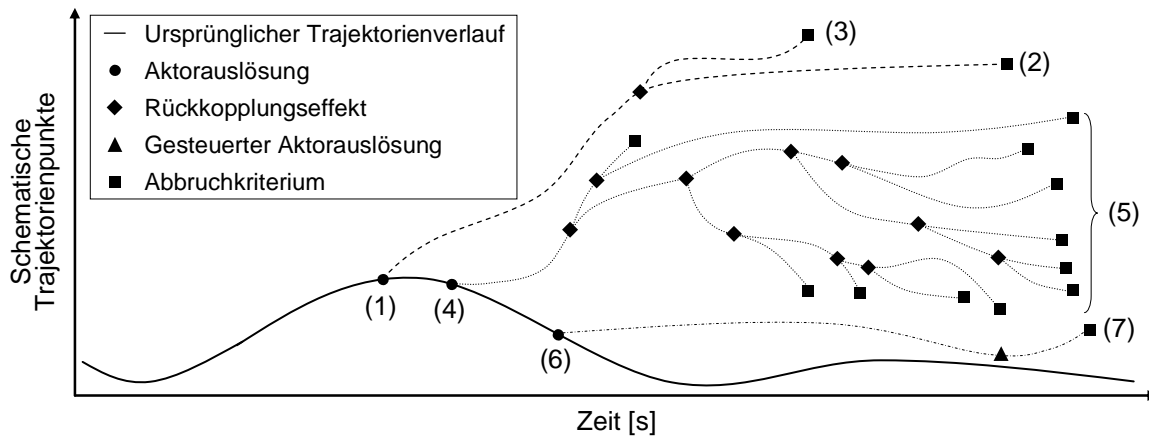


Abbildung 4-41: Schematische Veränderungen einer Kollisionssituation unter Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten oder gestaffelten Aktoreffekten

Besteht das Ziel darin, Rückkopplungseffekte in PreEffect-Open-Loop mit zu betrachten, ist der Schritt des Pre-Processings zu erweitern. Dies resultiert aus dem Umstand, dass die Bestimmung des Auslösezeitpunktes nur auf der zeitlichen Entwicklung der ursprünglichen Unfallsituation erfolgt und der Verlauf der Bewegungs- und Positionsdaten über die Vorausschuldauer der Untersimulationen im Post-Processing nicht verfügbar ist. Generell besteht die Möglichkeit, die zeitliche Veränderung der Szenarioparameter während des Pre-Processings mit aufzuzeichnen, wobei zu beachten ist, dass dieser Schritt unabhängig vom tatsächlichen Auslösezeitpunkt des Funktionsalgorithmus ist. Somit sind alle theoretisch möglichen Interaktionen des Sicherheitssystems vorab zu berücksichtigen. Die Anzahl zu simulierender Kombinationsmöglichkeiten geht dabei gegen unendlich. Dies ist schematisch durch die Verläufe (4) bis (5) in Abbildung 4-41 dargestellt. Der damit verbundene Aufwand zur Erzeugung und Verwaltung der Ergebnisdatenbank übersteigt den Nutzen einer zeit-effizienten Auswertemöglichkeit und Wiederverwendbarkeit der Daten deutlich.

Ähnlich der Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten stellt es sich bei einer Bewertung von gestaffelten Aktoreffekten dar. Darunter werden in dieser Arbeit Aktionen verstanden, wie beispielsweise die Einleitung einer Teilbremsung mit zeitlich verzögerter Notbremsung analog der Systembeschreibung nach [BOGENRIEDER 2009]. Ist zur Bestimmung der Auslösezeit für die exemplarische Notbremsung als zweiter Aktoreffekt eine weitere Auswertung der Bewegungsgrößen von Fahrzeug und Fußgänger nach Verlassen der ursprünglichen Unfalltrajektorie durch die Teilbremsung erforderlich, sind derartige Aktionen ohne die oben erläuterten Erweiterungsschritte mit PreEffect-Open-Loop nicht bewertbar. Anders stellt es

sich bei gestaffelten Aktoreffekten dar, welche in Analogie zur Regelungstechnik einer Steuerung entsprechen. Erfolgt eine Aktivierung der Notbremsung zu einer vorab definierbaren Auslösezeit nach der Teilbremsung, so ist eine Bewertung mit PreEffect-Open-Loop durchführbar, indem die gestaffelte Aktorauslösung bei der Datenerzeugung im Pre-Processing entsprechend implementiert wird. Dieser Fall ist durch den Verlauf (6) bis (7) in Abbildung 4-41 schematisch aufgezeigt.

4.5.2 Gesamtsystemsimulation im geschlossenen Regelkreis

Die Restriktionen, welche sich aus PreEffect-Open-Loop ergeben (Kapitel 4.5.1.3), erforderten die Entwicklung eines zweiten Simulationsverfahrens, das als PreEffect-Closed-Loop bezeichnet wird. Darin erfolgt keine Vorabsimulation von Aktoreffekten zu definierten Zeitinkrementen, sondern eine Auswertung des Gesamtsystemzustandes in jedem Simulationszeitschritt und eine Berechnung des Aktoreffektes nur zum tatsächlichen Aktivierungszeitpunkt. Die Basis für dieses Vorgehen bilden auch hier die ursprünglichen Unfallszenarien der Simulationsdatenbasis, so dass für jeden dieser Fälle die Veränderung der ursprünglichen Konfliktsituation infolge der Fahrzeugausstattung mit den aktiven Teilsystemkomponenten des integralen Sicherheitssystems analysiert wird (Abbildung 4-42).

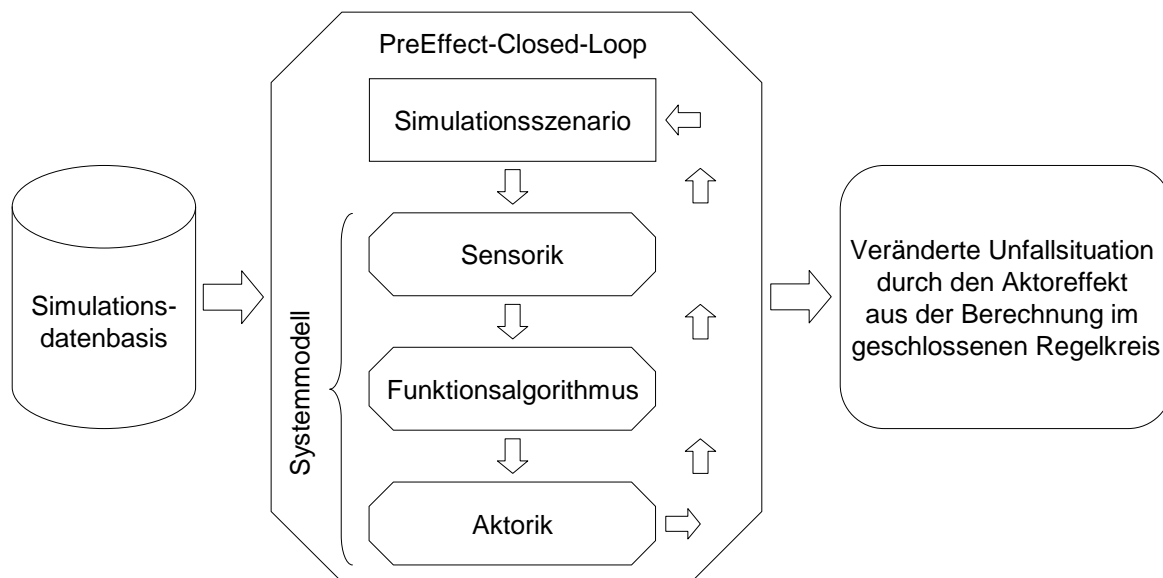


Abbildung 4-42: Auswerteprozess der aktiven Teilsystemkomponenten in PreEffect-Closed-Loop zur Ermittlung der veränderten Unfallsituationen

Durch PreEffect-Closed-Loop erfolgt in jedem Simulationszeitschritt eine Verarbeitung der vom Sensormodell zur Verfügung gestellten Objektliste im Funktionsalgorithmus. Ermittelt dieser, dass keine Auslösesituation vorliegt und somit keine Ansteuerung von Aktoren erfolgt, wird der nächste Simulationszeitschritt des ursprünglichen Unfallszenarios aus-

gewertet. Dieser Prozess entspricht noch dem Auswertevorgehen von PreEffect-Open-Loop. Zu einem Zeitpunkt, an dem vom Funktionsalgorithmus eine Auslösesituation detektiert wird, erfolgt eine Ansteuerung der Aktorik. Durch die Eingriffe in den Bewegungszustand des Fahrzeugs zum Auslösezeitpunkt resultiert eine Veränderung des ursprünglichen Unfallverlaufs. Im Unterschied zu PreEffect-Open-Loop erfolgt kein Auslesen eines vorsimulierten Aktoreffektes aus der Ergebnisdatenbank, sondern der neue Zustand des Unfallszenarios, resultierend aus der Aktorauslösung, wird in den folgenden Zeitschritten im Systemmodell ausgewertet.

Durch dieses Vorgehen werden der Sensorik und dem Funktionsalgorithmus über die gesamte Szenariodauer, auch bei einem Verlassen des zeitlichen Verlaufes der ursprünglichen Unfallsituation, Informationen zur Verfügung gestellt. Als Konsequenz erfolgt durch diese Simulationsart eine Auflösung der Restriktionen von PreEffect-Open-Loop und folglich eine Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten im Systemmodell. Ebenso stellt es sich für die Analyse von gestaffelten Aktorauslösungen dar, deren Aktivierungsschwellen über eine Verarbeitung der zeitlichen Entwicklung des Szenarioverlaufes im Funktionsalgorithmus bestimmt werden. Ferner gilt auch für PreEffect-Closed-Loop, dass Konflikte zwischen Fahrzeug und Fußgänger, welche sich nach dem Stillstand des Fahrzeugs ereignen, als vermiedene Kollisionen betrachtet werden.

Eine Bewertung von Aktorauslösungen zu definierten Zeitpunkten vor Kollision, wie diese bei den Algorithmusmodellen Time-To-Collision und der Einbindung realer Auslösezeiten aus der Erprobung vorliegt (Kapitel 4.4.2), mit PreEffect-Closed-Loop liefert äquivalente Resultate, wie durch eine Berechnung mit PreEffect-Open-Loop. Dies begründet sich dadurch, dass für diese Art der Bewertung im Regelfall keine Rückkopplungen betrachtet werden. Auf Grund kürzerer Auswertezeiten und gleicher Ergebnisqualität wird für diesen Anwendungsfall PreEffect-Open-Loop verwendet. Der Einsatz von PreEffect-Closed-Loop erfolgt daher primär für eine Bewertung fortgeschrittener Gesamtsystemmodelle, in welchen der Funktionsalgorithmus als Modell der realen Komponente realisiert ist.

4.6 Berechnung der Verletzungsschweren in den veränderten Unfallsituationen

Aus den veränderten Kollisionssituationen, ermittelt durch die beiden in Kapitel 4.5 dargestellten Simulationsverfahren, ist die Feldeffektivität noch nicht direkt ableitbar. Für diesen Schritt werden im weiteren Verlauf die veränderten Unfallparameter in Verletzungsschweren umgerechnet. Wie Kapitel 2.3.3 zeigt, erfolgt in der In-Depth-Datenbank eine sehr umfangreiche Dokumentation der Konfliktsituationen sowohl nach fahrzeug- und personen-

bezogenen Größen als auch nach den resultierenden Verletzungsausprägungen. Der Zusammenhang zwischen Unfallkonstellation und erlittener Verletzungsschwere ist somit in den Daten implizit vorhanden und wird zur Berechnung der Verletzungsschweren, welche aus den veränderten Kollisionssituationen resultieren, herangezogen. Für die funktionale Beschreibung des Verletzungsrisikos in Abhängigkeit definierter Einflussgrößen wird das Verfahren der multiplen binär-logistischen Regressionsanalyse eingesetzt (Kapitel 7.3).

4.6.1 Diskrete und risikobasierte Ansätze zur Berechnung von Verletzungsschweren

Die nachträgliche Ausstattung des Fahrzeugs mit einem Sicherheitssystem, unabhängig ob es sich dabei um aktive oder passive Maßnahmen handelt, führt zu einer Veränderung des ursprünglichen Unfallszenarios. Um die daraus resultierenden Verletzungsschweren zu quantifizieren, existieren im Allgemeinen zwei Ansätze. Diese werden als diskret oder risikobasiert bezeichnet. Der diskrete Ansatz charakterisiert sich durch eine Übertragung von beobachteten Verletzungsschweren aus Vergleichsunfällen, welche in der Datenbank vorhanden sind, auf die veränderten Unfallsituationen oder durch Modellannahmen, aus welchen diskrete Veränderungen der Verletzungsschweren resultieren. Das heißt für die erste Variante, befinden sich in der In-Depth-Datenbank Unfälle, welche mit der zu untersuchenden veränderten Kollisionssituation identisch sind, wird die dokumentierte Verletzungsschwere auf den veränderten Unfall übertragen. Voraussetzung ist eine in allen Unfallparametern übereinstimmende Referenzsituation. Im zweiten Fall erfolgt eine diskrete Veränderung von Verletzungsschweren durch Modellannahmen. Beispiele für diese Variante sind in den Arbeiten nach [HANNAWALD 2003] und [LIERS 2009] dargestellt.

Im Unterschied zum diskreten Ansatz erfolgt durch den Risikoansatz keine direkte Bestimmung der neuen Verletzungsschwere im Einzelfall, sondern die Erstellung eines Risikomodells. Aus diesem werden in Abhängigkeit von definierten Einflussgrößen Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung abgeleitet. Derartige Ansätze finden sich in den Arbeiten nach [BUSCH 2005] und [HANNAWALD 2003]. In [BUSCH 2005, S.55ff.] erfolgt die Generierung einer Wahrscheinlichkeitsfunktion auf einer eingeschränkten Unfalldatenbasis, welche ausgewählte Kollisionen mit einem definierten passiven Schutzniveau beinhaltet. Ein ähnliches Vorgehen zeigt sich in [HANNAWALD 2003, S.33ff.], wobei in diesem Fall die Basis für das Risikomodell aus Unfällen besteht, welche vorab durch einen diskreten modellbasierten Ansatz verändert werden, um auf diese Weise ein definiertes passives Schutzniveau zu berücksichtigen.

Die beiden Varianten, einen passiven Ausstattungsstand im Risikomodell entweder über eine Datensatzeinschränkung oder durch einen diskreten modellbasierten Ansatz umzusetzen, unterscheiden sich in einem wesentlichen Punkt. Im ersten Fall ist der Bewertungsumfang von vornherein begrenzt, da nur Sicherheitssysteme Berücksichtigung erfahren können, welche bereits in den Unfalldaten dokumentiert sind. Für die andere Variante gilt diese Einschränkung nicht, so dass durch diese eine Modellierung passiver Sicherheitsmaßnahmen erfolgt, welche zum Zeitpunkt der Bewertung nicht in den Unfalldaten vorhanden sind. Diesbezüglich ist zu beachten, dass die Modellgüte stark von der Realitätsnähe der zugrundeliegenden Annahmen abhängt. Die Anwendung eines diskreten Ansatzes, in welchem Verletzungsschweren von Referenzunfällen auf die veränderten Unfallsituationen übertragen werden, scheidet in dieser Arbeit aus. Dies begründet sich dadurch, dass die Informationen zu den dokumentierten Konfliktsituationen nicht ausreichen, um in allen Einflussparametern übereinstimmende Unfallsituationen zu identifizieren. Dies resultiert beispielsweise aus der komplexen Kinematik des Fußgängers im Verlauf des Fahrzeuganpralls, welche in der Datenbank derzeit und wohl auch künftig nicht detailliert dokumentiert ist.

Eine Modellierung des Zusammenhangs von Unfallparametern und erwarteter Verletzungsschwere in einem risikobasierten Ansatz erfordert die Generierung von Verletzungsrisikofunktionen. Diese auf Basis einer eingeschränkten Datenbasis zu erzeugen erfolgt aus zwei Gründen nicht. Zum einen finden sich in der Unfalldatenbank nur relativ wenige Fahrzeuge, welche eine fußgängerschutzoptimierte Frontstruktur besitzen, so dass sich auf deren Basis keine statistisch signifikanten Resultate ergeben. Zum anderen besteht das Ziel von PreEffect-iFGS darin, auch die Feldeffektivität von zukünftigen passiven Auslegungsstrategien zu bewerten, welche in logischer Konsequenz zum Bewertungszeitpunkt niemals in der Datenbank aufzufinden sind. Daher erfolgt zunächst eine diskrete modellbasierte Veränderung der Einzelunfälle, auf Basis derer im folgenden Schritt die Verletzungsrisikofunktionen durch das Verfahren der multiplen binär-logistischen Regressionsanalyse (Kapitel 7.3) generiert werden.

4.6.2 Generierung der Verletzungsrisikofunktionen

Die Schritte zur Generierung von Verletzungsrisikofunktionen und folglich der Durchführung einer binär-logistischen Regressionsanalyse gliedern sich nach [BACKHAUS 2008, S.250f.] in die Modellformulierung, Berechnung der logistischen Regressionsfunktion und Analyse der Modellgüte. Für den vorliegenden Anwendungsfall bedeutet dies, dass im Prozessschritt der Modellformulierung eine Identifikation der signifikanten Einflussgrößen auf die Verletzungsschwere der Fußgänger und Definition der unabhängigen Variablen erfolgt. Diesem wird ebenfalls das Vorgehen zur Berücksichtigung unterschiedlicher passiver Schutzsysteme zu-

geordnet. Der Modellbildung folgt eine Berechnung der Regressionskoeffizienten und Analyse der Modellgüte. Da die logistische Regressionsanalyse ein parametrisches Verfahren darstellt und der generelle Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängiger Variable durch den sigmoidalen Funktionsverlauf vorgegeben ist, erfolgt ein Vergleich des Berechnungsergebnisses mit den empirisch beobachteten Verletzungsrisiken und dem Resultat eines nichtparametrischen Schätzverfahrens. Darüber hinaus wird die Modellgüte neben mathematischen auch nach sachlogischen Kriterien beurteilt.

4.6.2.1 Identifikation der Einflussgrößen auf die Verletzungsschwere

Die Feldeffektivität ist als prozentuale Reduktion mindestens schwerverletzter Fußgänger definiert. Die Modellbildung verschiedener passiver Fahrzeugausstattungen erfolgt, wie in Kapitel 4.6.2.2 aufgezeigt wird, durch ein Verschieben von Einzelverletzungen des Fußgängers in Abhängigkeit der Anprallstellen am Fahrzeug. Diese einzelnen Letalitätsgrade sind nach deren anatomischer Entstehung und folglich der Abbreviated Injury Scale dokumentiert. Nach diesem Schritt besteht keine Möglichkeit mehr, Rückschlüsse auf die amtliche Verletzungsschwere zu ziehen. Die Erkenntnisse aus Abbildung 2-12 machen deutlich, dass MAIS2+ verletzte Fußgänger in guter Näherung als mindestens schwerverletzte Personen nach amtlicher Definition zu interpretieren sind. Aus diesem Grund erfolgt mit der binärlogistischen Regressionsanalyse zunächst eine Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung und zur Berechnung der Feldeffektivität eine Konvertierung in die amtliche Einteilung (Kapitel 4.7). Aus diesem Grund werden nachfolgend die Einflussgrößen auf MAIS2+ Fußgängererletzungen bestimmt.

Wie in der Literatur allgemein bekannt, hängt die Verletzungsschwere stark von der Kollisionsgeschwindigkeit ab. Erste Erkenntnisse aus der Unfallanalyse in Kapitel 2.3.3 zeigen eindeutig auf, dass neben der Kollisionsgeschwindigkeit weitere Größen auf den Schweregrad des Fußgängertraumas Einfluss nehmen, welche in den bisherigen Bewertungsmethoden aus Kapitel 3 weder analysiert noch für eine Berechnung der Verletzungsschwere berücksichtigt wurden. Im Unterschied zu Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen besteht bei einem Fußgängerunfall keine Kopplung zwischen den Kollisionsbeteiligten, so dass schwere Verletzungen auch durch den Sekundär-Anprall mit der Straße oder anderen Objekten der Umgebung resultieren (Abbildung 2-14). Ferner zeigt auch eine Betrachtung der Stoßkategorie (Abbildung 2-13) eine Verschiebung in Richtung schwere Verletzungen, wenn die Kollision als Vollstoß stattfindet. Auswertungen des Analysedatensatzes zur Fußgängeralters- und Kollisionsgeschwindigkeitsverteilung für die Verletzungsschwereklassen MAIS1 und MAIS2+ zeigen Abbildung 4-43 bzw. Abbildung 4-44. Die beiden Boxplots machen deutlich, dass in der Klasse MAIS2+ verletzter Fußgänger sowohl ein deutlich höheres Fußgängeralter als

auch eine offenkundig höhere Kollisionsgeschwindigkeit zu beobachten sind. Die Mediane von Fußgängeralter und Kollisionsgeschwindigkeit differieren um 16 Jahre bzw. 12 km/h. Daraus ist zu folgern, dass die körperliche Konstitution oder Vorschädigungen ebenfalls auf die Höhe der Verletzungsschwere einwirken, wobei zu beachten ist, dass diese Faktoren unter Umständen mit dem Fußgängeralter korrelieren. Ähnlich stellt es sich für die Größe des Fußgängers und den damit verbundenen Anprallpunkten dar. Nach [YANG 2005] resultiert für Kinder ein höheres Risiko für Verletzungen am Kopf und für Erwachsene an den unteren Extremitäten.

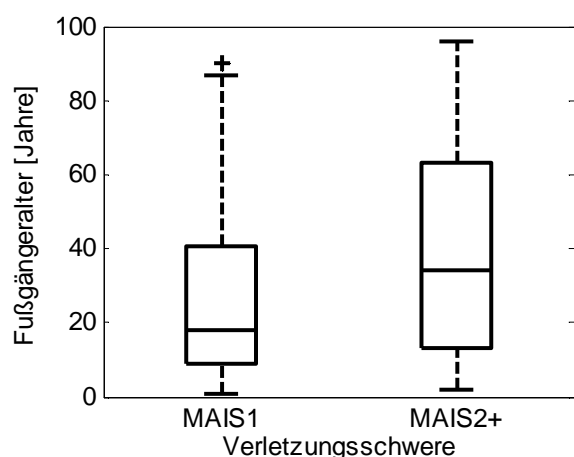


Abbildung 4-43: Boxplot des Fußgängeralters in den Verletzungsschwereklassen MAIS1 und MAIS2+ (Analysedatensatz)

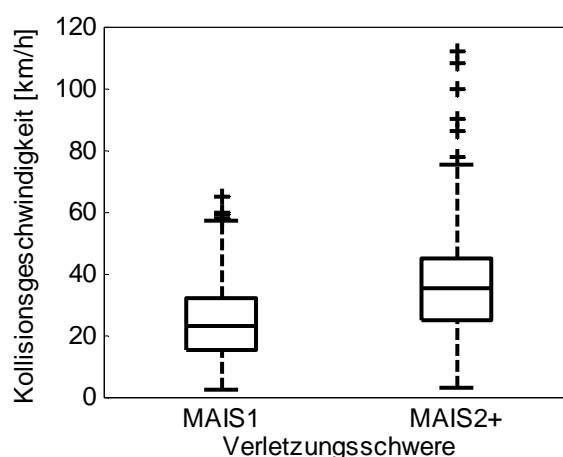


Abbildung 4-44: Boxplot Kollisionsgeschwindigkeit in den Verletzungsschwereklassen MAIS1 und MAIS2+ (Analysedatensatz)

Die vorherigen Ausführungen machen deutlich, dass die Höhe der Fußgängerverletzungsschwere von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängt. Daher werden die oben aufgeführten Einflussfaktoren durch die multiple binär-logistische Regressionsanalyse untersucht. Im Unterschied zur einfachen Regressionsanalyse erfolgt in diesem Verfahren eine Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung durch eine Kombination mehrerer unabhängiger Variablen. Die Entscheidung, ob nicht korrelierende unabhängige Variablen signifikanten Einfluss auf die Trennschärfe des Modells besitzen, erfolgt durch den Likelihood-Quotienten-Test (Kapitel 7.3.2) und der Wald-Statistik [BACKHAUS 2008, S. 273]. Die Analysen ergaben, dass die Kollisionsgeschwindigkeit die Haupteinflussgröße auf die Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung bildet. Ferner stellt nur das Fußgängeralter einen weiteren signifikanten Einflussparameter dar. Dieses trägt folglich auch zu einer Erhöhung der Erklärungskraft des logistischen Regressionsmodells bei. Die weiteren aufgeführten Größen besitzen keinen signifikanten Einfluss auf die Trennschärfe des Modells. Daher erfolgt eine Generierung der Verletzungsrisikofunktionen in Abhängigkeit der unabhängigen Variablen Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter.

Im Rahmen einer Identifikation von unabhängigen Variablen für das logistische Regressionsmodell ist zu beachten, dass nicht jeder beliebige Einflussfaktor, welcher in der Unfalldatenbank dokumentiert ist, für eine Berechnung der Verletzungswahrscheinlichkeit verwendet werden kann. Dies begründet sich dadurch, dass die neuen Ausprägungen der Einflussgrößen in den veränderten Kollisionssituationen von der zugrundeliegenden Simulationsumgebung zuverlässig berechenbar sein müssen oder durch den Systemeingriff keine Veränderung erfahren. Diese Randbedingungen erfüllen die beiden Einflussparameter Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter.

4.6.2.2 Modellbildung passiver Fußgängerschutzmaßnahmen nach EuroNCAP-Testergebnissen

Integrale Sicherheitssysteme besitzen neben den aktiven Teilsystemkomponenten auch passive Schutzmaßnahmen (Kapitel 4.1). Deren Modellbildung erfolgt, wie in Kapitel 4.6.1 erläutert, durch eine diskrete modellbasierte Veränderung der Einzelunfälle auf deren Basis die Verletzungsrisikofunktionen erzeugt werden. Dem Modellbildungsprozess liegt das Verfahren nach [LIERS 2009] zugrunde, wodurch eine Quantifizierung der Auswirkungen passiver Sicherheitsmaßnahmen zum Fußgängerschutz im Realunfallgeschehen erfolgt. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise ist in Kapitel 3.4 dargestellt. Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass Einzelverletzungen der verunfallten Fußgänger in Abhängigkeit von deren Entstehungsort reduziert werden. Im ersten Schritt erfolgt eine Ermittlung der EuroNCAP-Fußgängerprüfbereiche für jedes Fahrzeugmodell und danach eine Zuordnung der Fußgängereinzelerletzungen zu den entsprechenden Feldern. Verletzungen, welche in entsprechenden Testfeldern auftreten, werden in Abhängigkeit des jeweiligen Versuchsergebnisses verringert oder bleiben unverändert. Eine Verschiebung der Verletzungen erfolgt auf der AIS-Ebene, so dass nach der diskreten Veränderung ein geringerer oder unveränderter MAIS-Wert für jeden Fußgänger resultiert (Abbildung 3-19).

In Kapitel 4.6.2.1 erfolgt eine Identifikation der Kollisionsgeschwindigkeit und des Fußgängeralters als signifikante Einflussfaktoren auf die Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung. Folglich ist auch die Modellbildung der passiven Maßnahmen in Abhängigkeit dieser beiden Parameter durchzuführen. Die Kollisionsgeschwindigkeit wird in der Arbeit nach [LIERS 2009] explizit im Modellbildungsprozess berücksichtigt, da eine Reduktion der Verletzungsschwere nur für Konfliktsituationen mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von bis zu 40 km/h erfolgt. Das Fußgängeralter wird zur Ermittlung der Auswirkungen passiver Schutzmaßnahmen nicht explizit einbezogen. Der pessimistische Bewertungsansatz (Abbildung 3-18) reduziert die Verletzungsschwere des Fußgängers, indem der AIS-Wert immer um eine Differenz und nicht auf eine definierte Ausprägung verschoben wird. Durch den

pessimistischen Ansatz erfolgt daher implizit eine Berücksichtigung des Effektes, dass ein steigendes Fußgängeralter trotz passiver Maßnahmen zu tendenziell höheren Verletzungen führt. Ferner werden im pessimistischen Ansatz nur Verletzungen betrachtet, für welche eine direkte Adressierung im EuroNCAP-Testverfahren erfolgt. Diese Annahme stellt sich als zu pessimistisch dar, da davon auszugehen ist, dass eine entsprechende Optimierung der Fahrzeugfrontstruktur auch positiv auf alle anderen Verletzungen wirkt. Dieser Effekt ist im optimistischen Ansatz berücksichtigt.

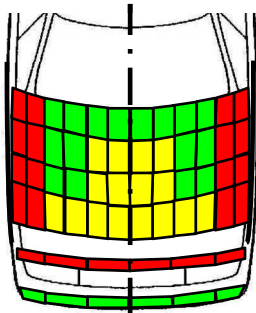


Abbildung 4-45: Exemplarisches EuroNCAP-Testergebnis von 18 Punkten [LIERS 2009]

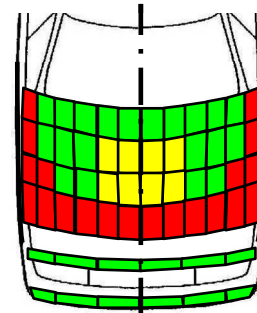


Abbildung 4-46: Exemplarisches EuroNCAP-Testergebnis von 24 Punkten [LIERS 2009]

Aus den zuvor dargelegten Gründen erfolgt in PreEffect-iFGS die Modellbildung der passiven Fußgängerschutzmaßnahmen durch eine Kombination aus optimistischem und pessimistischem Bewertungsansatz (Abbildung 3-18). Folglich werden alle Einzelverletzungen nach Maßgabe des pessimistischen Ansatzes in Abhängigkeit der Testfeldfarbe verändert. Zur Durchführung einer Systembewertung mit PreEffect-iFGS in Kapitel 5 werden zwei exemplarische EuroNCAP-Testergebnisse analog der Vorgehensweise nach Abbildung 3-19 auf den Analysedatensatz angewendet und die neuen MAIS-Werte bestimmt. Die beiden Ergebnisvarianten sind der Studie nach [LIERS 2009] entnommen und beziehen sich auf kein konkretes Fahrzeugmodell, stellen aber realistische Testergebnisse dar. Das fiktive Testergebnis in Abbildung 4-45 repräsentiert ein Bewertungsergebnis von 18 Punkten und das in Abbildung 4-46 eines von 24 Punkten. Die daraus resultierenden neuen MAIS-Werte der Einzelunfälle bilden die Basis zur Generierung der beiden dichotomen abhängigen Variablen und folglich zur Berechnung der Regressionsfunktionen in Kapitel 4.6.2.3. Durch diese Art der Modellbildung erfolgt analog den aktiven Teilsystemkomponenten eine Integration von Erkenntnissen aus realen Komponententests für passive Fußgängerschutzmaßnahmen.

Der Modellbildung passiver Fußgängerschutzmaßnahmen nach [LIERS 2009] liegen folgende Hypothesen zugrunde. Wesentlich ist die Annahme, dass alle Einzelverletzungen, welche aus der Datenbank über lateralen Abstand und Abwickellänge identifiziert werden, an den entsprechenden Bauteilen entstanden sind, für welche das zu bewertende Testergebnis gültig ist. Ferner erfolgt für jede Einzelverletzung eine äquidistante Reduktion des AIS-Wertes.

Die AIS-Skala stellt eine ordinale Rangfolge mit nichtlinearem Zusammenhang dar (Abbildung 2-5). Daher entspricht eine Erhöhung der Überlebenswahrscheinlichkeit von AIS3 auf AIS2 nicht derjenigen von AIS6 auf AIS5. Weiter wird unterstellt, dass alle Fahrzeuge ein ursprüngliches EuroNCAP-Testergebnis von null Bewertungspunkten besitzen.

4.6.2.3 Berechnung der logistischen Regressionsfunktionen

Die Ergebnisse aus den Prozessschritten zur Identifikation der Einflussgrößen auf eine MAIS2+ Verletzung des Fußgängers und der Modellbildung einer passiven Fahrzeugausstattung stellen die Eingangsparameter für eine Berechnung der logistischen Regressionsfunktionen dar. In Kapitel 4.6.2.1 erfolgt eine Ermittlung der Kollisionsgeschwindigkeit und des Fußgängeralters als signifikante Einflussfaktoren auf die Verletzungsschwere. Folglich werden diese beiden Größen als unabhängige Variablen mit metrischem Skalenniveau in das multiple binär-logistische Regressionsmodell integriert. In deren Abhängigkeit erfolgt eine Bestimmung des Verlaufes der Eintrittswahrscheinlichkeiten, eine Verletzung des Schweregrades MAIS2+ zu erleiden. Die Regressionsgleichung des multiplen binär-logistischen Modells ist somit nach Gl. 4-15 definiert.

$$p_{\text{MAIS2+}} = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_{v_k} \cdot v_k + \beta_{\text{alter}} \cdot \text{alter})}} \quad \text{Gl. 4-15}$$

mit $p_{\text{MAIS2+}}$ = Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAIS2 + Verletzung

β_0 = Konstante

β_{v_k} = Regressionskoeffizient der Kollisionsgeschwindigkeit

β_{alter} = Regressionskoeffizient des Fußgängeralters

v_k = Kollisionsgeschwindigkeit

alter = Fußgängeralter

Die Generierung von drei dichotomen abhängigen Variablen erfolgt zum einen auf Basis der unveränderten Einzelunfälle des Analysedatensatzes und zum anderen auf den resultierenden MAIS-Werten nach einer diskreten modellbasierten Veränderung der Einzelunfälle des Analysedatensatzes (Kapitel 4.6.2.2). Im ersten Fall spiegelt die Regressionsfunktion den Zusammenhang zwischen Kollisionsgeschwindigkeit, Fußgängeralter und korrespondierender Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung wider, wie dieser in der In-Depth-Datenbank dokumentiert ist. In den beiden anderen Fällen werden die modellierten EuroNCAP-Bewertungsergebnisse von 18 bzw. 24 Punkten (Abbildung 4-45 bzw. Abbildung 4-46) zugrunde gelegt. Der Effekt einer entsprechenden passiven Fußgängerschutzmaßnahme ist folglich im Regressionsmodell und somit in der Verletzungsrisikofunktion ent-

halten. Auf Grund der guten Übereinstimmung zwischen der in der Datenbank dokumentierten Kollisionsgeschwindigkeit und den Resultaten der Simulationsdatenbasis (Abbildung 4-13) werden zur Berechnung der Regressionsparameter die Werte für die Kollisionsgeschwindigkeiten aus der In-Depth-Datenbank herangezogen.

| | Analysedatensatz (unverändert) | 18 EuroNCAP-Punkte (modelliert) | 24 EuroNCAP-Punkte (modelliert) |
|---|--|--|--|
| β_0 | -2,330 | -2,735 | -2,807 |
| β_{vk} [95%-Konf.] LQ-Test | 0,057 [0,045; 0,069] $\alpha < 0,01$ | 0,064 [0,052; 0,076] $\alpha < 0,01$ | 0,065 [0,053; 0,077] $\alpha < 0,01$ |
| β_{alter} [95%-Konf.] LQ-Test | 0,019 [0,013; 0,026] $\alpha < 0,01$ | 0,014 [0,009; 0,021] $\alpha < 0,01$ | 0,013 [0,007; 0,019] $\alpha < 0,01$ |

Abbildung 4-47: Regressionsparameter und Signifikanzniveau des Likelihood-Quotienten-Tests für den unveränderten Analysedatensatz und die beiden modellierten EuroNCAP-Testergebnisse

Für alle drei Varianten erfolgt eine Ermittlung des Parameters β_0 und der Regressionskoeffizienten β_{vk} bzw. β_{alter} . Zur Durchführung der Regressionsanalyse wird die Softwareimplementierung nach [SPSS 2009] eingesetzt. Die berechneten Modellparameter der Regressionsfunktion aus Gl. 4-15 mit entsprechenden Konfidenzintervallen für den unveränderten Analysedatensatz und die beiden modellierten EuroNCAP-Testergebnisse nach Maßgabe des optimistischen Bewertungsansatzes (Abbildung 3-18) sind in Abbildung 4-47 dargestellt. Beide Logit-Koeffizienten weisen für jede Datengrundlage positive Werte auf. Folglich erhöht sowohl eine Steigerung der Kollisionsgeschwindigkeit als auch des Fußgängeralters die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung. Ferner verdeutlicht eine Betrachtung der 95%-Konfidenzintervalle, dass kein Regressionskoeffizient im Vertrauensbereich einen Vorzeichenwechsel erfährt. Folglich ist die positive Einflussrichtung statistisch signifikant. Die Resultate des Likelihood-Quotienten-Tests (LQ-Test) zeigen auf, dass die beiden unabhängigen Variablen Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter einen signifikanten Einfluss ($\alpha < 0,01$) auf die Modellzusammenhänge besitzen und kein Modell-Overfitting vorliegt (Kapitel 7.3.2).

Eine Visualisierung der drei Verletzungsrisikofunktionen für den unveränderten Analysedatensatz und der beiden modellierten EuroNCAP-Testergebnisse erfolgt in Abbildung 4-48 bis Abbildung 4-50. Diese zeigen, dass sich der Effekt einer verbesserten passiven Schutzwirkung in einer sinkenden Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung, bei einer gegebenen Kombination unabhängiger Variablen, widerspiegelt.

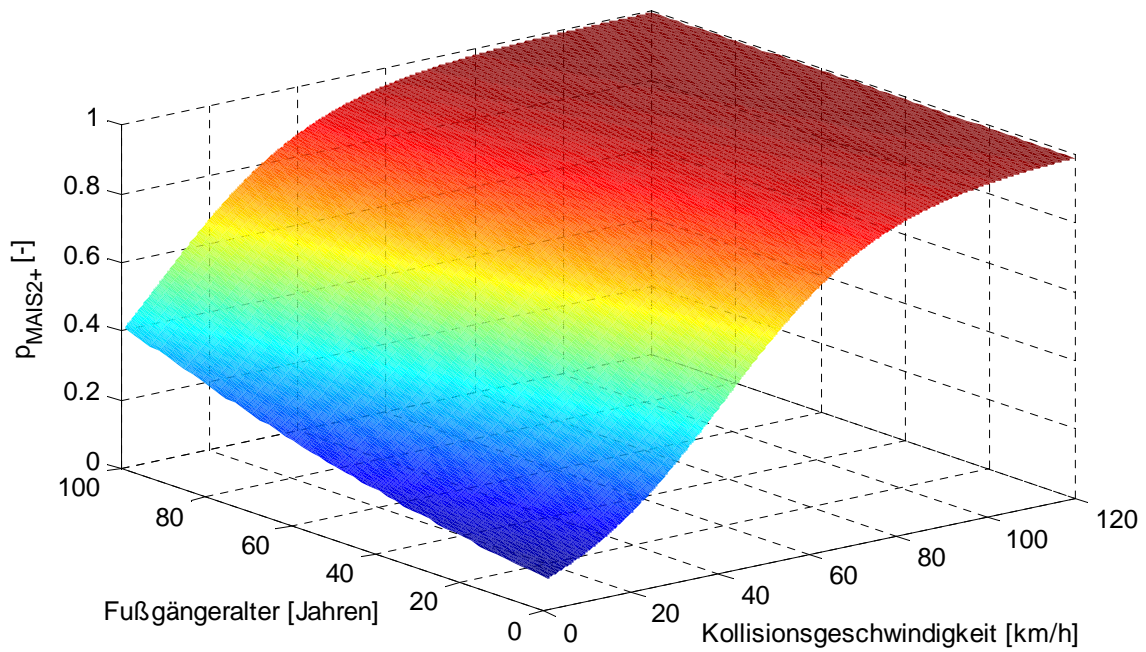


Abbildung 4-48: Verletzungsrisikofunktion in Abhängigkeit von Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter auf Basis des unveränderten Analysedatensatzes

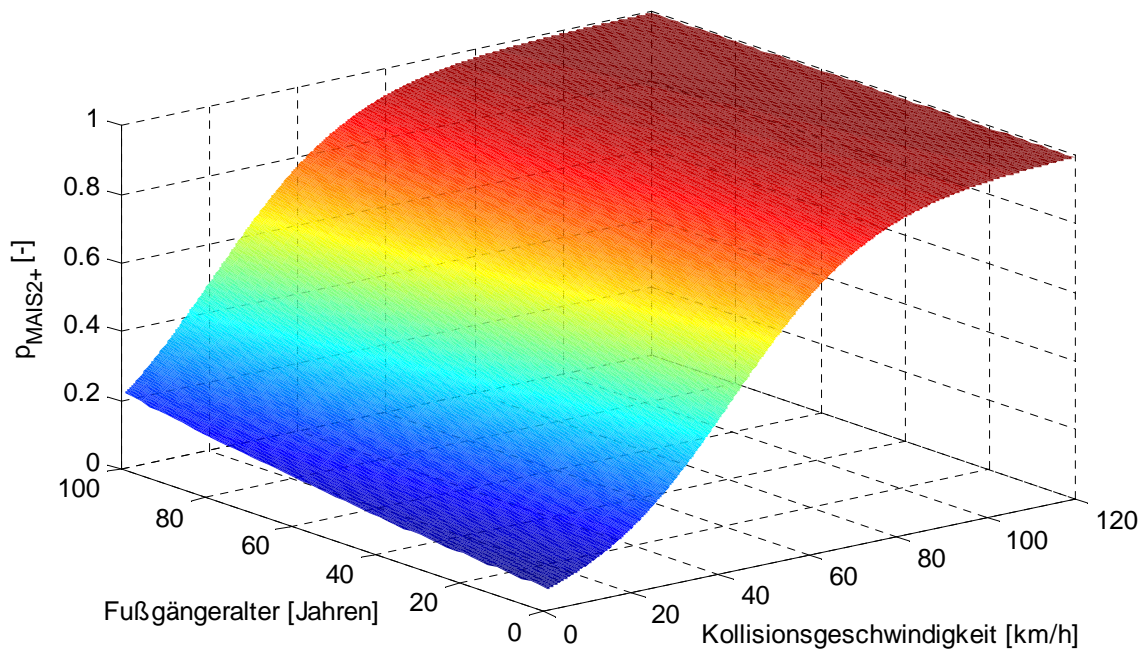


Abbildung 4-49: Verletzungsrisikofunktion in Abhängigkeit von Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter für das modellierte EuroNCAP-Testergebnis von 18 Punkten im Analysedatensatz

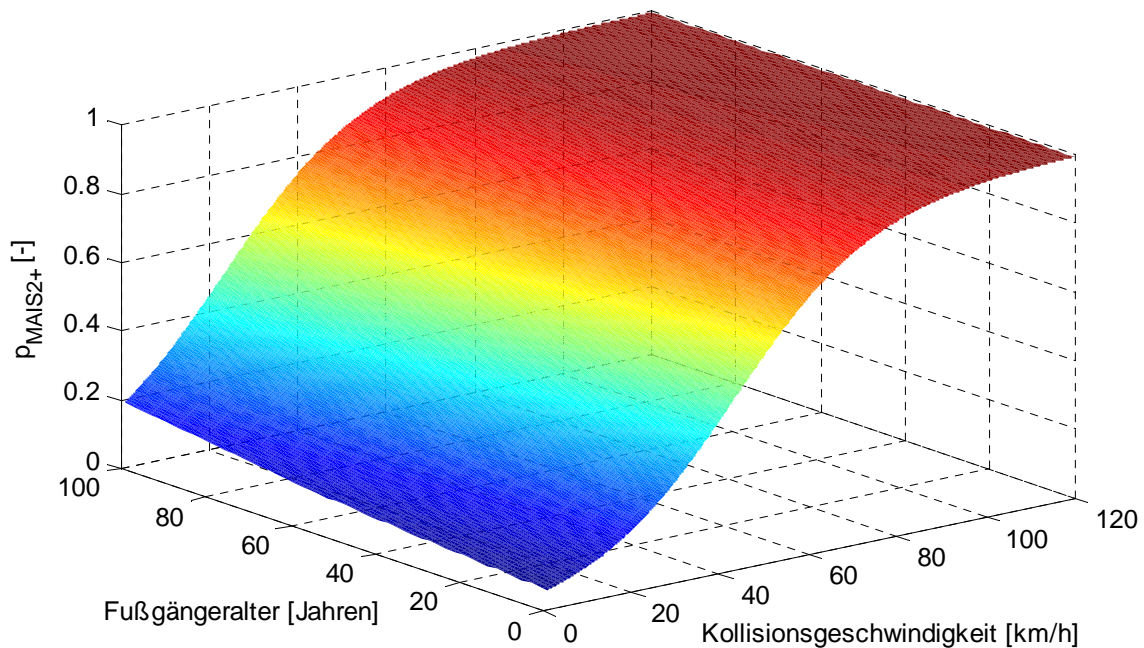


Abbildung 4-50 Verletzungsrisikofunktion in Abhängigkeit von Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter für das modellierte EuroNCAP-Testergebnis von 24 Punkten im Analysedatensatz

4.6.2.4 Mathematische Gütebetrachtung der logistischen Regressionsmodelle

Den Prozessschritten der Modellformulierung und Berechnung der logistischen Regressionsparameter folgt eine Analyse der Modellgüte. Für dieses Vorgehen existieren eine Reihe von Kennwerten, durch welche die Qualität des logistischen Regressionsmodells quantifiziert wird. Die mathematischen Grundlagen dieser Kriterien und deren Interpretationen sind in Kapitel 7.3.2 erläutert. Die korrespondierenden Ausprägungen dieser Kennwerte, für die in Kapitel 4.6.2.3 generierten binär-logistischen Regressionsfunktionen, sind in Abbildung 4-51 dargestellt.

Aus einer Betrachtung der Ergebnisse des Likelihood-Ratio-Tests (LR-Test) folgt, dass die Regressionsfunktionen für alle drei Datenbasen der abhängigen Variablen statistisch signifikant sind ($\alpha < 0,01$). Die unabhängigen Variablen besitzen daher eine hohe Erklärungskraft und liefern einen signifikanten Beitrag zur Unterscheidung der Ausprägungen der abhängigen Variablen. Die Überprüfung des Signifikanzniveaus erfolgt durch eine Chi-Quadrat-Verteilung. Nach [FAHRMEIR 2007B, S. 205] ist diese nur dann vorauszusetzen, wenn die Fallanzahl je Ausprägung der abhängigen Variable hinreichend groß ist. Aus diesem Grund werden die Analysen nach einer Bildung von Kollisionsgeschwindigkeits- und Fußgängeraltersgruppen wiederholt. Aus diesen Untersuchungen ergeben sich äquivalente Ergebnisse

des Likelihood-Ratio-Tests, analog der Darstellung in Abbildung 4-51. Aus den beiden Kenngrößen der Pseudo-R²-Statistiken resultieren Werte im Bereich von 0,2 bis 0,3. Folglich bestätigen diese Qualitätsmaße die hohe Erklärungskraft der Regressionsmodelle, welche auch durch die zuvor durchgeführten Likelihood-Ratio-Tests ermittelt wird.

| | Analysedatensatz (unverändert) | 18 EuroNCAP-Punkte (modelliert) | 24 EuroNCAP-Punkte (modelliert) |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| LR-Test | $\alpha < 0,01$ | $\alpha < 0,01$ | $\alpha < 0,01$ |
| Cox & Snell-R ² | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Nagelkerke-R ² | 0,2 | 0,3 | 0,3 |
| Klassifikations- ergebnis | 0,671 | 0,690 | 0,701 |
| PZW | 0,500 | 0,512 | 0,517 |
| Hosmer- Lemeshow-Test | $\alpha = 0,773$ | $\alpha = 0,528$ | $\alpha = 0,593$ |
| Press's Q-Test | $\alpha < 0,01$ | $\alpha < 0,01$ | $\alpha < 0,01$ |

Abbildung 4-51: Gütekriterien der logistischen Regressionsmodelle für den unveränderten Analysedatensatz und die beiden modellierten EuroNCAP-Testergebnisse

Die Klassifikationsergebnisse liegen für alle drei Regressionsmodelle über den entsprechenden proportionalen Zufallswahrscheinlichkeiten (PZW). Die Prozentsätze der richtig klassifizierten Elemente im Regressionsmodell übersteigen somit die korrespondierenden proportionalen Zufallswahrscheinlichkeiten. Die Prüfgrößen des Hosmer-Lemeshow-Tests mit Signifikanzen von $\alpha = 0,528$ bis $\alpha = 0,773$ bestätigen, dass die Abweichungen zwischen den vom Modell vorhergesagten und empirisch beobachteten Häufigkeiten für eine MAIS2+ Verletzungen nicht häufiger als dem Zufall entsprechend auftreten. Der Press's Q-Test verdeutlicht durch die hohen Signifikanzniveaus ($\alpha < 0,01$), dass die Klassifikationsergebnisse signifikant von einer zufälligen Zuordnung verschieden sind.

Aus den oben dargelegten Erkenntnissen ist abzuleiten, dass das Verfahren der multiplen binär-logistischen Regressionsanalyse sehr gut geeignet ist, um die Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung in Fußgänger-Pkw-Kollisionen in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit und des Fußgängeralters zu berechnen. Alle in Abbildung 4-51 dargestellten Ausprägungen der Gütekriterien belegen die hohe Qualität der Approximation an die zugrundeliegenden Datenbasen.

4.6.2.5 Empirische und sachlogische Gütebetrachtung des logistischen Regressionsmodells

Die Anwendung der multiplen binär-logistischen Regressionsanalyse, zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten einer MAIS2+ Verletzung, unterstellt einen sigmoidalen Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängiger Variable nach Gl. 7-7. Dieser wird durch den Parameter β_0 und die Regressionskoeffizienten β_j nach maximaler Wahrscheinlichkeit an die zugrundeliegende Datenbasis approximiert. Obgleich die hohe Güte der Modellanpassung und folglich die Anwendbarkeit der binär-logistischen Regressionsanalyse durch die Berechnung objektiver Qualitätsmaße in Kapitel 4.6.2.4 nachgewiesen wird, erfolgen zusätzliche Analysen, ob die Annahme des sigmoidalen Kurvenverlaufs im Rahmen einer empirischen Untersuchung des Verletzungsrisikos bestätigt wird.

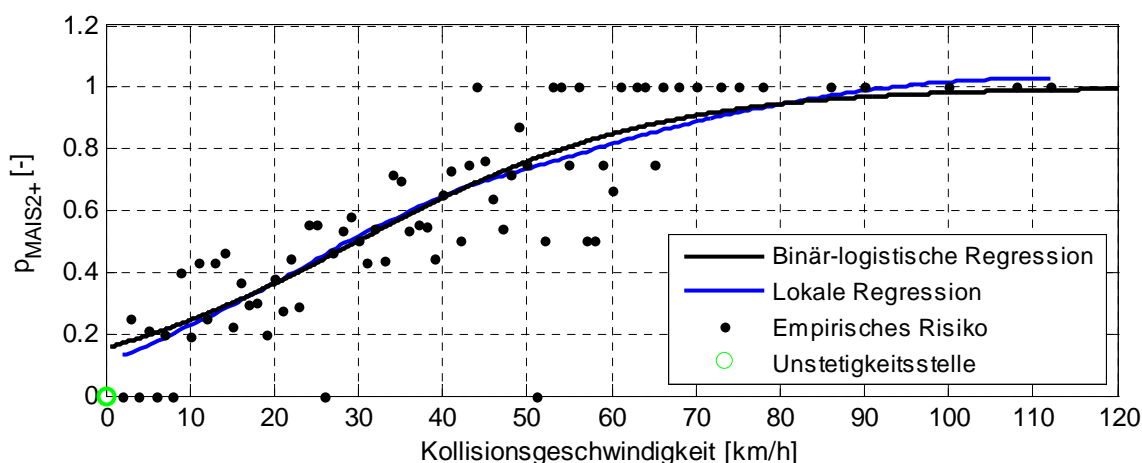


Abbildung 4-52: Berechnete Eintrittswahrscheinlichkeiten einer MAIS2+ Verletzung in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit im unveränderten Analysedatensatz

Diesbezüglich erfolgt im ersten Schritt die Erzeugung einer Verletzungsrisikofunktion nach dem Verfahren der einfachen binär-logistischen Regressionsanalyse. Folglich erfährt nur die Kollisionsgeschwindigkeit als Haupteinflussgröße (Kapitel 4.6.2.1) Berücksichtigung im Modell. In deren Abhängigkeit wird die Regressionsfunktion in Anlehnung an Kapitel 4.6.2.3 berechnet. Den resultierenden Verlauf zeigt Abbildung 4-52. Um den Nachweis zu erbringen, dass der sigmoidale Zusammenhang die empirische Entwicklung des Verletzungsrisikos widerspiegelt, erfolgt zusätzlich eine Berechnung des Wahrscheinlichkeitsverlaufes durch ein nicht-parametrisches Regressionsverfahren. Diese finden nach [HARRELL 2005, S.24] Einsatz, um den Trend zwischen abhängiger und unabhängiger Variable zu identifizieren und die Modellannahmen eines parametrischen Regressionsverfahrens zu validieren. Im Unterschied zu den parametrischen Verfahren treffen diese keine Annahme zur Form des Zusammenhangs.

Das angewendete nicht-parametrische Verfahren stammt aus der Gruppe der k-Nächste-Nachbarn-Schätzer und wird als lokale gewichtete Regression bezeichnet [FAHRMEIR 2007B, S.333ff.], [LOADER 1999]. Dadurch erfolgt eine Substitution der ursprünglichen Datenpunkte durch Werte einer lokalen quadratischen Trendfunktion, welche aus der Regression benachbarter Datenpunkte resultiert. Nach [HARRELL 2005, S. 24] stellt dieses Verfahren das bekannteste zur Glättung von Funktionsverläufen dar. Zusätzlich werden die k-Nachbarn durch eine trikubische Funktion gewichtet, wobei dem zu glättenden Datenpunkt das höchste Gewicht und somit der größte Einfluss zugewiesen wird. Für weiter entfernte Nachbarn sinkt die Gewichtung und Werte außerhalb der definierten k-Nachbarn erfahren keine Berücksichtigung für die Regression. Die Definition der Intervallgröße erfolgt derart, dass für jede lokale Regression zwei Drittel der Gesamtdatenpunkte einbezogen werden. Durch diese Wahl der Fensterbreite resultiert nach [HARRELL 2005, S.25] eine hohe Approximationsqualität. Die Berechnung erfolgt mit der Softwareimplementierung nach [CRAN 2010]. Den resultierenden Funktionsverlauf zeigt Abbildung 4-52.

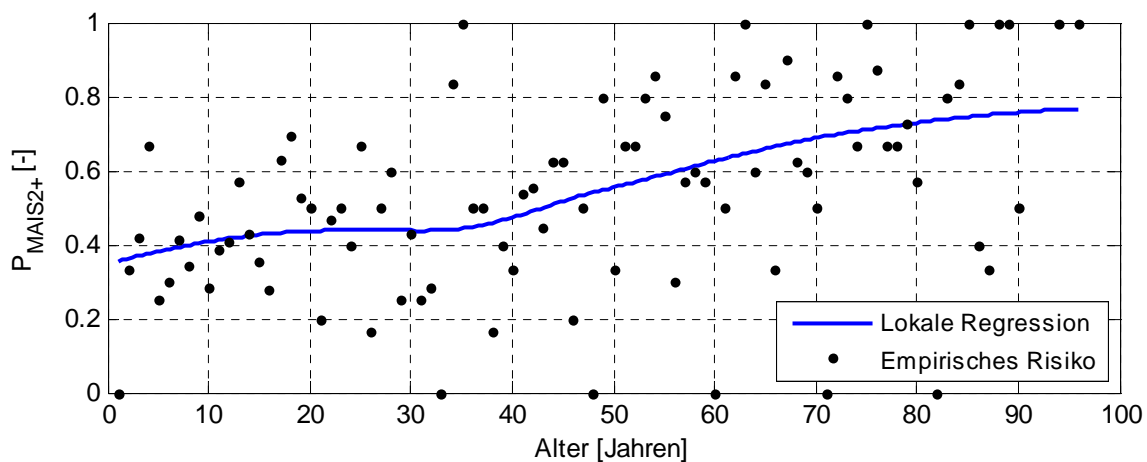


Abbildung 4-53: Berechnete Eintrittswahrscheinlichkeiten einer MAIS2+ Verletzung in Abhängigkeit des Fußgängeralters im unveränderten Analysedatensatz

Darüber hinaus ist in Abbildung 4-52 zusätzlich das empirische Risiko dargestellt, eine MAIS2+ Verletzung zu erleiden. Dieses beschreibt den Anteil MAIS2+ verletzter Fußgänger an der Gesamtzahl der Verletzten je beobachteter Kollisionsgeschwindigkeit. Eine vergleichende Bewertung der drei Berechnungsergebnisse nach Abbildung 4-52 macht deutlich, dass sowohl für das nicht-parametrische Regressionsverfahren als auch die empirisch ermittelten Verletzungswahrscheinlichkeiten ein sigmoidaler Zusammenhang zwischen der Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAS12+ Verletzung und der Kollisionsgeschwindigkeit auftritt. Folglich bestätigen diese Analyseresultate die Annahme des grundlegenden Zusammenhangs der logistischen Regressionsanalyse.

Wie in Kapitel 4.6.2.1 erläutert, resultiert aus einer zusätzlichen Betrachtung des Fußgängeralters eine Erhöhung der Approximationsgüte des logistischen Regressionsmodells. Den Verlauf der Eintrittswahrscheinlichkeiten für eine MAIS2+ Verletzung über diesen Einflussfaktor zeigt Abbildung 4-53. Darin sind sowohl die empirischen Risiken als auch der Kurvenverlauf der zuvor erläuterten lokalen gewichteten Regression dargestellt. Die Abbildung macht deutlich, dass der sigmoidale Verlauf des Verletzungsrisikos auch über das Fußgängeralter auftritt. Folglich ist die Annahme des logistischen Regressionsmodells durch die empirisch beobachteten Zusammenhänge für diesen Einflussparameter ebenfalls validiert.

In der Arbeit nach [REBLE 2010] wird ein alternativer Modellierungsansatz vorgestellt, welcher die leichte Plateaubildung in Abbildung 4-53 berücksichtigt. Das verwendete Regressionsverfahren stammt aus der Gruppe der Generalisierten Additiven Modelle (GAM) [FAHRMEIR 2007B, S.399ff.], [WOODS 2006]. Die Analyseergebnisse nach [REBLE 2010] ergeben, dass der Einfluss des Fußgängeralters durch die Generalisierten Additiven Modelle im Vergleich zum logistischen Regressionsansatz etwas besser abgebildet wird. Auf Grund der leichteren Interpretierbarkeit, geringeren Komplexität, des reduzierten Rechenaufwandes und der hohen Ergebnislösungsgüte des logistischen Regressionsmodells erfolgt die Feststellung, dass zur Generierung von Verletzungsrisikofunktionen für Fußgänger-Pkw-Kollisionen das Verfahren der multiplen binär-logistischen Regressionsanalyse dem der Generalisierten Additiven Modelle vorzuziehen ist.

Die mathematische Beschreibung des logistischen Regressionsmodells in Anlehnung an Gl. 4-15 und Visualisierung in Abbildung 4-52 machen deutlich, dass durch das Modell eine Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 0 km/h berechnet wird. Dieser Umstand ist sachlogisch nicht zu begründen, da in den Unfalldaten des Analysedatensatzes kein Fall vorhanden ist, in dem ein Fußgänger durch ein stehendes Fahrzeug verletzt wird (Abbildung 4-52). Die Verläufe in Abbildung 4-52 zeigen eine Erhöhung des Verletzungsrisikos mit steigender Kollisionsgeschwindigkeit, wobei auch bei geringen Anprallgeschwindigkeiten MAIS2+ Verletzungen zu beobachten sind. Da der Regressionsansatz das Ziel verfolgt, die logistische Verteilungsfunktion nach maximaler Wahrscheinlichkeit an die Datengrundlage zu approximieren und MAIS2+ Verletzungen verstärkt in höheren Geschwindigkeitsbereichen auftreten, resultiert der nicht vorhandene Nulldurchgang. Als Konsequenz erfolgt eine Adaption der berechneten Regressionsmodelle an die Sachlogik, indem eine Unstetigkeitsstelle definiert wird. Folglich resultiert aus einer Kollisionsgeschwindigkeit von 0 km/h eine korrespondierende Eintrittswahrscheinlichkeit von Null (Abbildung 4-52). Diese Anpassung ist zulässig, da in den Unfalldaten bereits bei sehr geringen Anprallgeschwindigkeiten MAIS2+ Verletzungen auftreten.

4.7 Berechnung der Kenngröße Feldeffektivität

Bei der Feldeffektivität handelt es sich um die Kenngröße, welche Aufschluss über die Leistungsfähigkeit des integralen Sicherheitssystems im Realunfallgeschehen gibt. Diese ist nach Kapitel 4.2.1 als prozentuale Reduktion der Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger definiert. Im Rahmen des Berechnungsprozesses erfolgt zunächst eine Ermittlung der neuen Anzahl MAIS2+ verletzter Fußgänger aus den veränderten Unfallsituationen, welche danach in die amtliche Verletzungsschwereklassifikation umgerechnet werden. Da in der In-Depth-Datenbank Kollisionssituationen vorhanden sind, welche auf Grund unbekannter Parameter keine Berücksichtigung im Analyseprozess erfahren, erfolgte die Entwicklung einer Methode, um diese mit in die Berechnung der Feldeffektivität einzubeziehen.

4.7.1 Untersuchung der Verteilungskonsistenz zwischen Wirkfeld- und Analysedatensatz

Die in PreEffect-iFGS exemplarisch integrierte In-Depth-Datenbank beinhaltet im Vergleich zur amtlichen Verkehrsunfallstatistik eine relativ geringe Fallzahl. Daher erfolgt eine Analyse, wie die beiden Erhebungen zueinander in Verbindung stehen. Die Erkenntnisse daraus ermöglichen Rückschlüsse zur direkten Übertragbarkeit der ermittelten Feldeffektivität auf das Fußgängerunfallgeschehen der Bundesrepublik Deutschland und folglich eine Interpretierbarkeit der Kenngröße. Die Berechnung der Feldeffektivität erfolgt auf Basis von Einzelunfällen aus einer In-Depth-Datenbank, wobei auch Konfliktsituationen mit unbekanntem Kollisionsparametern Berücksichtigung und keinen Ausschluss aus dem Bewertungsprozess erfahren. Für dieses Vorgehen wird untersucht, ob der Analysedatensatz eine hinreichend gute Stichprobe des Wirkfelddatensatzes (Kapitel 2.3.2) bildet und somit eine repräsentative Datenbasis darstellt, in welcher das integrale Sicherheitssystem aktiv ist.

Im ersten Schritt erfolgt daher eine Analyse der Verteilungen ausgewählter Unfallparameter zwischen Fußgänger-Gesamtdatensatz und der amtlichen Verkehrsunfallstatistik. Erste Erkenntnisse über den Zusammenhang werden aus den Analysen in Kapitel 2.1.3 deutlich. Darauf basierend zeigen Abbildung 4-54 und Abbildung 4-55 eine vergleichende Darstellung der Kollisionsgegner und der Ortslage. In beiden Illustrationen ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen. Weiter zeigt sich dieses Resultat auch bezüglich Fußgängeralter (Abbildung 4-56), Straßenzustand (Abbildung 4-57) und Lichtverhältnisse (Abbildung 4-58). Eine Betrachtung der amtlichen Verletzungsschweren verdeutlicht, dass die In-Depth-Datenbank mehr schwer- und weniger leichtverletzte Fußgänger enthält (Abbildung 4-59). Dieser Effekt begründet sich nach [PFEIFFER 2006] durch das Meldeverhalten der Behörden, welche tendenziell schwerere Unfälle an das Projekt GIDAS weiterleiten.

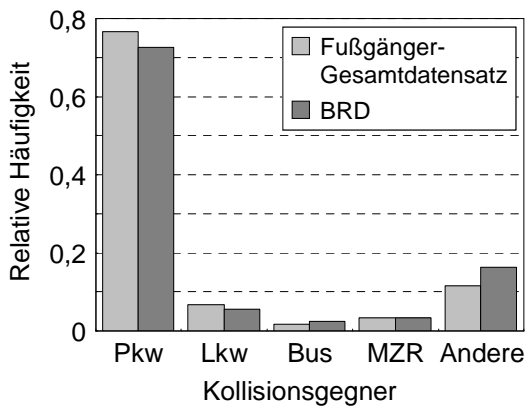


Abbildung 4-54: Kollisionsgegner der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=31.541)

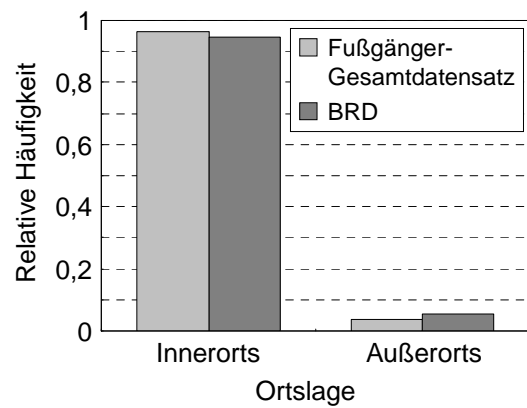


Abbildung 4-55: Ortslage der Fußgängerunfälle im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=33.423)

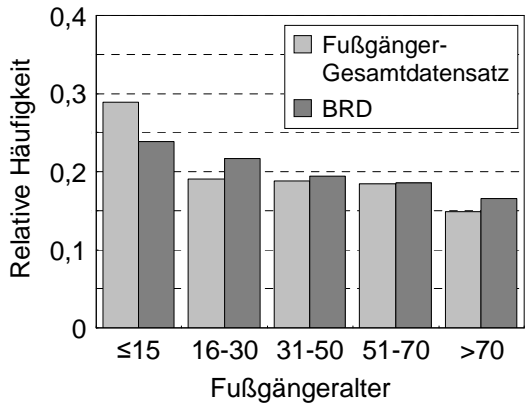


Abbildung 4-56: Alter der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=33.423)

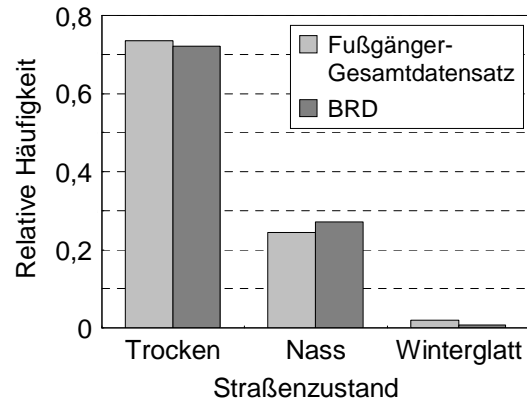


Abbildung 4-57: Straßenzustände bei Fußgängerunfällen im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=33.423)

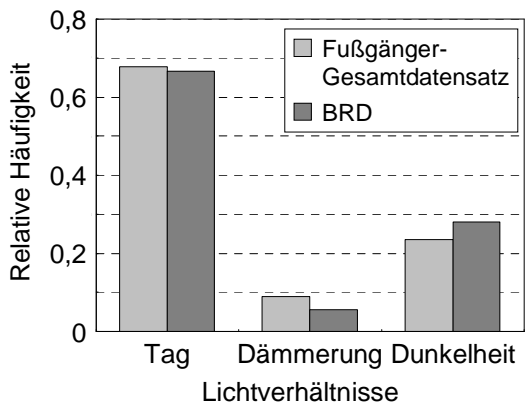


Abbildung 4-58: Lichtverhältnisse bei Fußgängerunfällen im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=33.423)

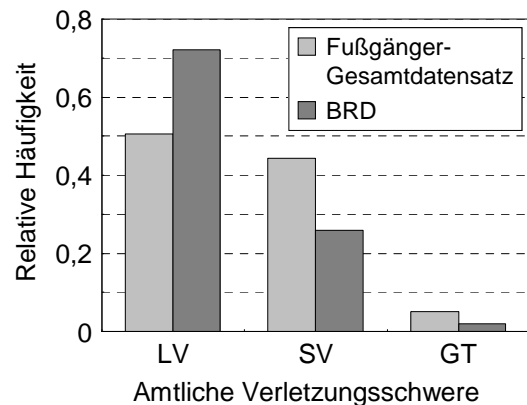


Abbildung 4-59: Amtliche Verletzungsschweren der Fußgänger im Fußgänger-Gesamtdatensatz und auf Bundesebene (n=33.423)

Der Vergleich des Fußgänger-Gesamtdatensatzes mit der amtlichen Erhebung zeigt, dass dieser im Allgemeinen ein repräsentatives Abbild für das Fußgängerunfallgeschehen auf deutschen Straßen bildet, wobei in der In-Depth-Datenbank eine Verzerrung in Richtung schwere Unfälle auftritt (Abbildung 4-59). Auf Basis des Fußgänger-Gesamtdatensatzes berechnete Feldeffektivitäten stellen folglich eine maximale Obergrenze für die Bundesebene dar und führen zu einer leichten Überschätzung der Leistungsfähigkeit des Systems für das gesamtdeutsche Fußgängerunfallgeschehen.

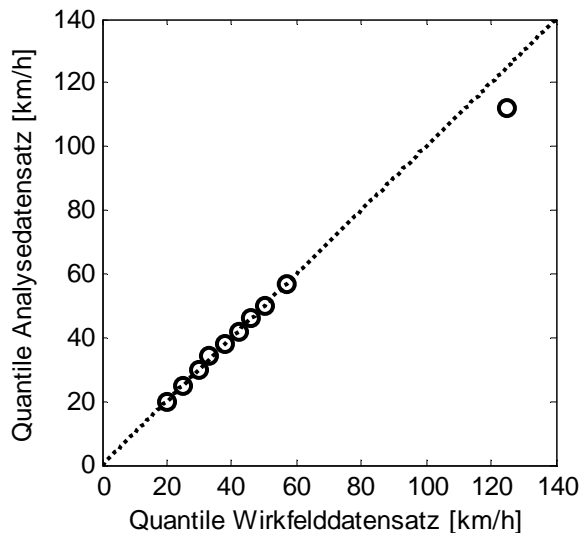


Abbildung 4-60: Q-Q-Diagramm der Ausgangsgeschwindigkeit im Wirkfeld- und Analyse-datensatz für die Quantile Q_1 bis Q_{10}

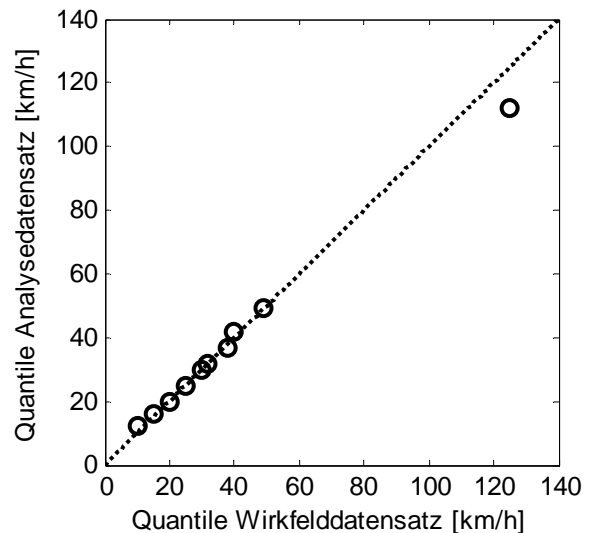


Abbildung 4-61: Q-Q- Diagramm der Kollisionsgeschwindigkeit im Wirkfeld- und Analyse-datensatz für die Quantile Q_1 bis Q_{10}

Da wegen fehlender Unfallparameter nicht für alle Einzelunfälle des Wirkfelddatensatzes die Möglichkeit besteht, diese in der Simulationsumgebung nachzubilden, erfolgt die Überprüfung, ob der Analysedatensatz eine hinreichend gute Stichprobe für das Wirkfeld des integralen Sicherheitssystems darstellt. Ist dies der Fall, kann die absolute Feldeffektivität des Analysedatensatzes auf den gesamten Wirkfelddatensatz übertragen werden. Um diesen Nachweis zu führen, erfolgt eine Gegenüberstellung ausgewählter Unfallparameter für die beiden Datensätze. Erste Erkenntnisse sind bereits in Kapitel 2.3.3 dargestellt. Eine Betrachtung von Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10 zeigt nahezu identische Verteilungen der Pre-Crash-Parameter in beiden Datensätzen. Zusätzlich sind in Abbildung 4-60 und Abbildung 4-61 Q-Q-Diagramme der Ausgangs- und Kollisionsgeschwindigkeit dargestellt, welche nach [TOUTENBURG 2009, S. 29f.] Einsatz für einen Vergleich der Verteilungen zweier Stichproben finden. Nach [TOUTENBURG 2009, S. 29f.] liegt eine gute Übereinstimmung vor, wenn sich alle Quantilpaare auf der Winkelhalbierenden befinden.

4. PreEffect-iFGS – Methode zur Berechnung der Feldeffektivität

Für die Ausgangs- bzw. Kollisionsgeschwindigkeit in Abbildung 4-60 bzw. Abbildung 4-61 ist dieses Kriterium sehr gut erfüllt. Die Q-Q-Diagramme für die mittlere Bremsverzögerung (Abbildung 4-62) und Fußgängeralter (Abbildung 4-63) zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung beider Datensätze, wobei im Analysedatensatz weniger ungebremste Kollisionen enthalten sind. Ferner resultiert aus den vergleichenden Darstellungen von amtlicher Verletzungsschwere (Abbildung 4-64) und Erstberührungspunkt (Abbildung 4-65) eine gute Konformität. Ebenso stellt es sich für, Ortslage (Abbildung 4-66) Straßenzustand (Abbildung 4-67), Unfalltyp und Lichtverhältnisse dar.

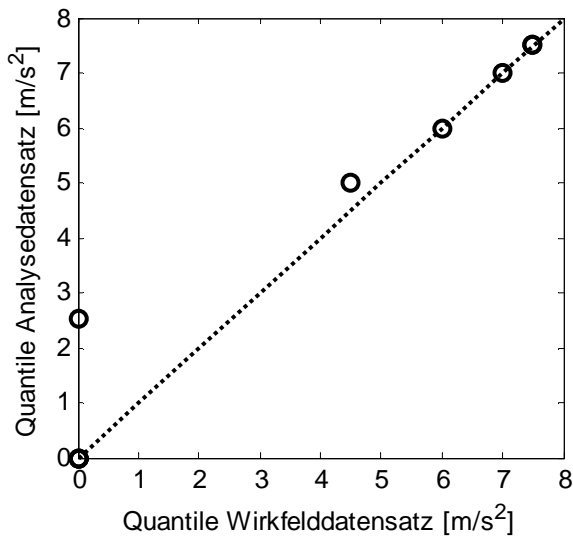


Abbildung 4-62: Q-Q-Diagramm der mittleren Bremsverzögerung im Wirkfeld- und Analysedatensatz für die Quantile Q_1 bis Q_{10}

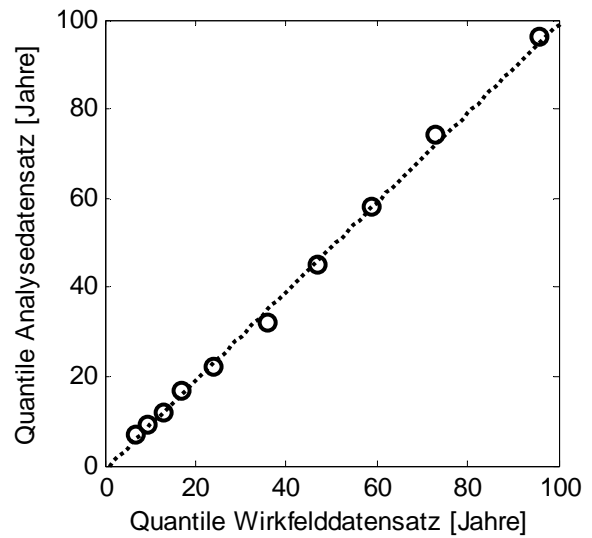


Abbildung 4-63: Q-Q-Diagramm des Fußgängeralters im Wirkfeld- und Analysedatensatz für die Quantile Q_1 bis Q_{10}

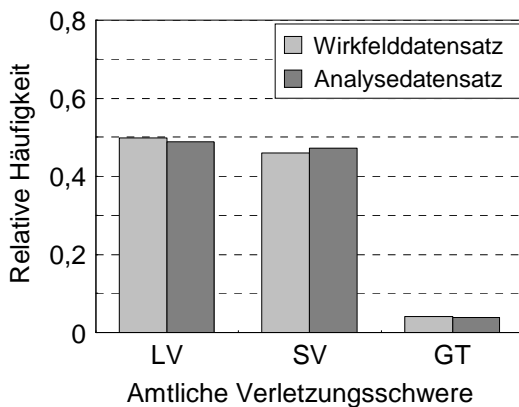


Abbildung 4-64: Amtliche Verletzungsschweren der Fußgänger im Wirkfeld- und Analysedatensatz

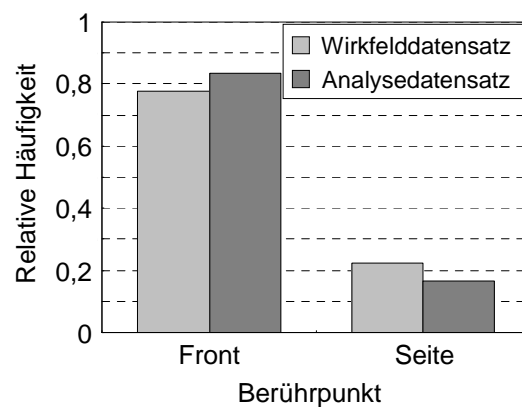


Abbildung 4-65: Erstberührungspunkte der Fußgänger am Fahrzeug im Wirkfeld- und Analysedatensatz

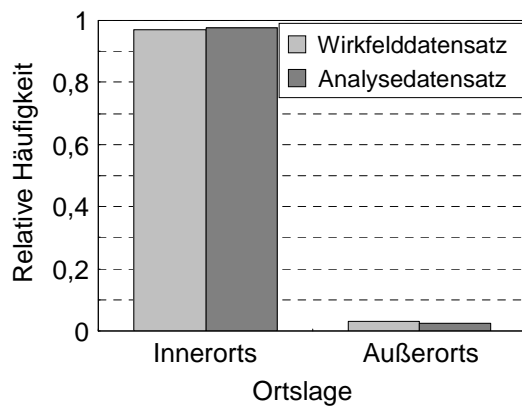


Abbildung 4-66: Ortslage der Fußgängerunfälle im Wirkfeld- und Analysedatensatz

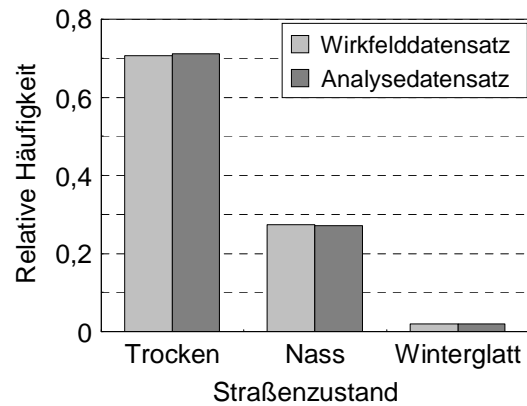


Abbildung 4-67: Straßenzustände bei Fußgängerunfällen im Wirkfeld- und Analysedatensatz

Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Unfallanalysen zur Verteilungskonsistenz von Analyse- und Wirkfelddatensatz zeigen, dass diese bezüglich der amtlichen Verletzungsschweren und den darauf Einfluss nehmenden Größen (Kapitel 4.6.2.1), wie zum Beispiel Kollisionsgeschwindigkeit, Fußgängeralter oder Erstberührungspunkt am Fahrzeug sehr gut übereinstimmen. Weiter ist diese Feststellung auch für andere Parameter zu erkennen, welche auf das Systemverhalten einwirken. Die Verteilung von Ausgangsgeschwindigkeit, Bremsverzögerung und Umgebungsparametern, wie Ortslage, Straßenzustand, Lichtverhältnisse oder Unfalltyp weisen ebenfalls eine sehr hohe Kongruenz auf. Folglich ist nachgewiesen, dass der Analysedatensatz eine hinreichend gute Stichprobe des gesamten Wirkfelddatensatzes darstellt und die Möglichkeit besteht, die Feldeffektivität des Analysedatensatzes auf alle Einzelunfälle des Wirkfelddatensatzes zu übertragen.

Detailliertere Analysen, wie beispielsweise eine Untersuchung oben dargestellter Verteilungen ausschließlich für Außerortsunfälle oder getötete Fußgänger, können auf Grund der geringen Fallzahl, welche aus einer derartigen Gruppierung resultiert, nicht durchgeführt werden. Darüber hinaus besteht keine Möglichkeit, andere Datensätze, wie beispielsweise den Fußgänger-Pkw-Datensatz oder Wirkfelddatensatz der amtlichen Verkehrsunfallstatistik gegenüberzustellen, da diese Informationen für derartige Einschränkungen des Fußgängerunfallgeschehens in der amtlichen Verkehrsunfallstatistik nicht bereitgestellt werden.

4.7.2 Berechnung der erwarteten Anzahl MAIS2+ verletzter Fußgänger

Die Entscheidung für eine risikobasierte Variante zur Berechnung der Verletzungsschweren aus den veränderten Unfallkonstellationen hat zur Konsequenz, dass für den Einzelunfall keine Möglichkeit mehr besteht, Aussagen zur diskreten Veränderung des Fußgängertraumas zu treffen. Aus den Verletzungsrisikofunktionen resultieren Informationen zur Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verletzung. Wie in Kapitel 4.6.2.2 dargestellt, erfolgt die Modellbildung passiver Maßnahmen durch ein Verschieben von Einzelverletzungen, welche nach der Abbreviated Injury Scale dokumentiert sind. Nach diesem Schritt ist die resultierende amtliche Verletzungsschwere nicht mehr bekannt, welche einer Berechnung der Kenngröße Feldeffektivität zugrunde liegt. Die Erkenntnisse aus Abbildung 2-12 zeigen, dass eine Klassifizierung der Fußgängerverletzungsschwere von MAIS2+ in guter Näherung der amtlichen Gruppierung mindestens schwerverletzt entspricht. Aus diesem Grund erfolgt im ersten Schritt eine Ermittlung der Anzahl MAIS2+ verletzter Fußgänger und danach eine Rückrechnung in die amtliche Klassifikation (Kapitel 4.7.3). Die Anzahl MAIS2+ verletzter Fußgänger resultiert aus einer Summierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für eine MAIS2+ Verletzung über alle betrachteten Einzelunfälle. Deren Bestimmung erfolgt durch die Regressionsfunktion in Abhängigkeit von Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter nach Gl. 4-16.

$$E_{\text{MAIS2+}} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} p_{\text{MAIS2+}}(v_{k,i}, \text{alter}_i) & \text{für } v_{k,i} > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 4-16}$$

mit $E_{\text{MAIS2+}}$ = Anzahl MAIS2+ verletzter Fußgänger

$$p_{\text{MAIS2+}} = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_{v_k} \cdot v_{k,i} + \beta_{\text{alter}} \cdot \text{alter}_i)}}$$

n = Anzahl der Einzelunfälle

v_k = Kollisionsgeschwindigkeit

alter = Fußgängeralter

Aus der Bremsaktik, als Bestandteil der aktiven Teilsystemkomponenten des integralen Sicherheitssystems, resultiert eine Reduktion der ursprünglichen Kollisionsgeschwindigkeit v_k zu v_k' . Eine Verringerung dieser Einflussgröße führt zu einer Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung ($\Delta p_{\text{MAIS2+}}|A$) nach Abbildung 4-68, in welcher zwei Verletzungsrisikofunktionen für ein konstantes Fußgängeralter dargestellt sind. Darüber hinaus zeigt Abbildung 4-68 den Einfluss der Modellbildung passiver Fußgängerschutzmaßnahmen, wie bereits in Kapitel 4.6.2.3 erläutert. In der Darstellung besitzt die modellierte passive Maßnahme B ein höheres Schutzniveau als die Maßnahme A.

Diese Gegebenheit äußert sich entsprechend in den Kurvenverläufen, so dass für eine konstante Kollisionsgeschwindigkeit v_k' aus der Verletzungsrisikofunktion der Variante B eine geringere Verletzungswahrscheinlichkeit resultiert. Ferner geht aus Abbildung 4-68 hervor, dass durch das höhere passive Schutzniveau der Maßnahme B, bei gleicher Wirkungsweise der aktiven Teilsystemkomponenten (v_k zu v_k'), eine zusätzliche Reduktion des Verletzungsrisikos ($\Delta p_{\text{MAIS2+}|B} - \Delta p_{\text{MAIS2+}|A}$) im Vergleich zur unterstellten passiven Maßnahme A im Ursprungsunfall resultiert. Somit erfolgt durch die individuelle Parametrisierung der Regressionsfunktionen nach Gl. 4-16 mit den Werten aus Abbildung 4-47 eine Berücksichtigung unterschiedlicher passiver Fahrzeugausstattungen in Form modellierter EuroNCAP-Testergebnisse bei gleichzeitiger Betrachtung der Wirkungsweise aktiver Teilsystemkomponenten zur Ermittlung der neuen Anzahl MAIS2+ verletzter Fußgänger in den veränderten Kollisionssituationen.

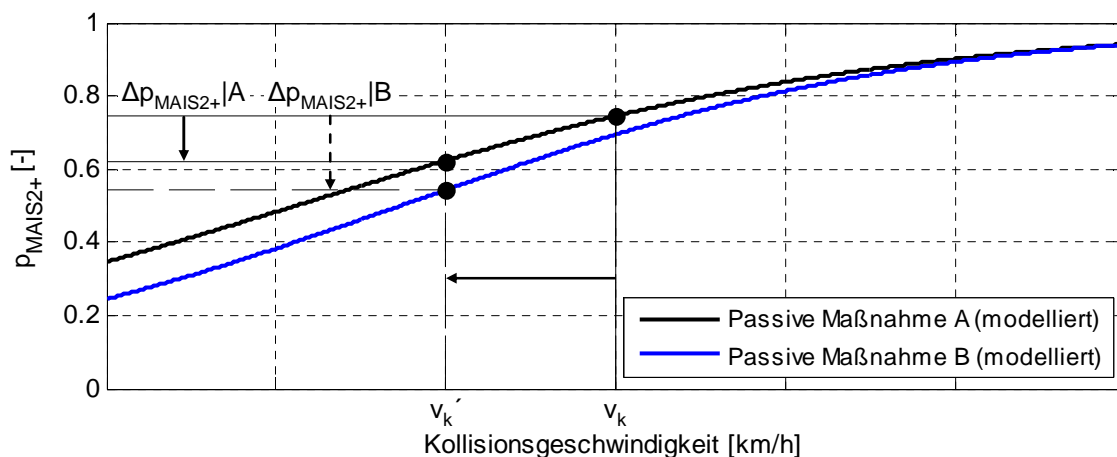


Abbildung 4-68: Eintrittswahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung in Abhängigkeit von einer Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit und modellierten passiven Maßnahmen

Auf Grund der Adaption der Verletzungsrisikofunktionen an die Sachlogik, wie in Kapitel 4.6.2.5 erläutert, erfolgt für Einzelunfälle, in denen keine Kollision stattfindet auch keine Auswertung im Regressionsmodell. Als Konsequenz werden diese Unfallsituationen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ und MAIS1 Verletzung von Null in die Berechnung einbezogen (Gl. 4-16). Ebenso stellt es sich für Fälle dar, in welchen der Fußgänger in ein bereits zum Stillstand gekommenes Fahrzeug läuft. Die Ermittlung der Anzahl MAIS1 Verletzter erfolgt analog Gl. 7-4 durch ein Aufsummieren der Gegenwahrscheinlichkeiten, sofern die Konfliktsituation nicht verhindert wird.

4.7.3 Umrechnung der Abbreviated Injury Scale in die amtliche Verletzungsschwereklassifikation

Die Inhalte von Kapitel 4.7.2 machen deutlich, dass auf Grund der Methode zur Modellbildung verschiedener passiver Ausstattungsvarianten zum Fußgängerschutz im ersten Schritt eine Ermittlung der Anzahl MAIS1 und MAIS2+ Verletzter erfolgt. Diese werden für eine bessere Interpretation in die amtliche Verletzungsschwere zurückgerechnet. Der Zusammenhang zwischen beiden Dokumentationsarten für die verunfallten Fußgänger ist in Abbildung 2-12 dargestellt. Diese beinhaltet die bedingten Wahrscheinlichkeiten [FAHRMEIR 2007A, S. 204] mindestens ein schweres Trauma nach amtlicher Klassifikation, unter der Bedingung einer MAIS2+ bzw. MAIS1 Verletzung zu erleiden. Aus dieser Information und den erwarteten MAIS2+ und MAIS1 Verletzten nach Gl. 4-16 erfolgt eine Berechnung der Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger nach Gl. 4-17.

$$N_{SV+} = E_{MAIS2+} \cdot p_{SV+|MAIS2+} + E_{MAIS1} \cdot p_{SV+|MAIS1} \quad \text{Gl. 4-17}$$

mit N_{SV+} = Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger
 E_{MAIS2+} = Anzahl MAIS2 + verletzter Fußgänger
 E_{MAIS1} = Anzahl MAIS1 verletzter Fußgänger
 $p_{SV+|MAIS2+}$ = Wahrscheinlichkeit für ein mindestens schweres Trauma unter der Bedingung einer MAIS2 + Verletzung
 $p_{SV+|MAIS1}$ = Wahrscheinlichkeit für ein mindestens schweres Trauma unter der Bedingung einer MAIS1 Verletzung

4.7.4 Berechnung der absoluten und relativen Feldeffektivität

Im letzten Prozessschritt zur Ermittlung der Feldeffektivität erfolgt eine Berechnung der prozentualen Reduktion mindestens schwerverletzter Fußgänger. Die Ausführungen von Kapitel 2.3.2 machen deutlich, dass in der Unfalldatenbank Einzelfälle enthalten sind, welche für die Analyse der Systemwirkungsweise in der Simulationsumgebung nicht berücksichtigt werden können. Dies begründet sich durch ein Fehlen definierter Unfallparameter. Es erfolgt die Feststellung, dass ein Teil dieser Kollisionssituationen im generellen Wirkfeld des integralen Sicherheitssystems liegen und folglich von einem vorwärts fahrenden Pkw der Klasse M1 verursacht werden. Diese Situationen sind in Abbildung 2-6 dem Nicht-Analysedatensatz zugeordnet. Da in Kapitel 4.7.1 der Nachweis erfolgt, dass der Analysedatensatz eine repräsentative Sichtprobe des Wirkfelddatensatzes darstellt, wird die absolute Feldeffektivität des Analysedatensatzes auf den Wirkfelddatensatz übertragen. Erfolgt dieser Schritt nicht,

wird die absolute Feldeffektivität des integralen Sicherheitssystems unterschätzt. Die Berechnung dieser Kenngröße als eine Darstellungsvariante der Feldeffektivität zeigt Gl. 4-18.

$$fe_{FG-Pkw,absolut,S_j} = \frac{N_{SV+,wirkfeld} \cdot fe_{analyse,absolut,S_j}}{N_{SV+,FG-Pkw}} \quad \text{Gl. 4-18}$$

$fe_{FG-Pkw,absolut,S_j}$ = Absolute Feldeffektivität im Fußgänger - Pkw - Datensatz für ein System S_j

$N_{SV+,wirkfeld}$ = Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im Wirkfeldatensatz

$fe_{analyse,absolut,S_j}$ = Absolute Feldeffektivität im Analysedatensatz für ein System S_j

$N_{SV+,FG-Pkw}$ = Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im FG - Pkw - Datensatz

Eine Berechnung der absoluten Feldeffektivität im Analysedatensatz erfolgt nach Gl. 4-19. Die Wahl der Bezugsgröße in Gl. 4-18 hängt davon ab, für welches Unfallgeschehen die absolute Feldeffektivität ausgewiesen wird. Zur Berechnung der absoluten Feldeffektivität eines integralen Sicherheitssystems im Fußgängerunfallgeschehen mit Pkw der Klasse M1 wird als Bezugsbasis die Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im FG-Pkw-Datensatz verwendet.

$$fe_{analyse,absolut,S_j} = \frac{N_{SV+,analyse} - N_{SV+,analyse,S_j}}{N_{SV+,analyse}} \quad \text{Gl. 4-19}$$

mit $fe_{analyse,absolut,S_j}$ = Absolute Feldeffektivität im Analysedatensatz für ein System S_j

$N_{SV+,analyse}$ = Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im Analysedatensatz

$N_{SV+,analyse,S_j}$ = Anzahl mindestens schwerverletzter Fußgänger im Analysedatensatz für ein System S_j

Die zweite Darstellungsvariante der Feldeffektivität stellt sich als relative Feldeffektivität dar. Deren Berechnungsvorschrift nach Gl. 4-20 macht deutlich, dass zur Ermittlung der relativen Feldeffektivität die absolute Feldeffektivität eines Systems S_j in Bezug zu der eines Referenzsystems S_k gesetzt wird. Diese Visualisierungsform findet Einsatz zur vergleichenden Bewertung unterschiedlicher Systemvarianten und ist um die Referenzdatenbasis bereinigt. Die relative Feldeffektivität liefert eine Aussage um wie viel besser oder

schlechter ein System S_j gegenüber einem Referenzsystem S_k ist. Ferner erfordert diese Darstellungsform keine Hochrechnung, wie in [BUSCH 2005, S.61ff.] dargestellt, da die relative Feldeffektivität nach Gl. 4-20 auch bezüglich der Hochrechnungsfaktoren bereinigt ist. Diese Erkenntnis resultiert aus einer Betrachtung der Berechnungsgleichungen zur Prognose des physiologischen Sicherheitsgewinns nach [BUSCH 2005, S.63f]. Es ist darauf hinzuweisen, dass durch die relative Feldeffektivität lediglich eine vergleichende Bewertung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Systemstrategien erfolgt. Ohne gleichzeitigen Einbezug der korrespondierenden absoluten Feldeffektivitäten der Systeme S_j und S_k ist diese Kenngröße nur eingeschränkt interpretierbar, da keine Aussage zum absoluten Sicherheitsgewinn getroffen wird.

$$fe_{S_j, S_k, \text{relativ}} = \frac{fe_{\text{analyse, absolut, } S_j}}{fe_{\text{analyse, absolut, } S_k}} \quad \text{Gl. 4-20}$$

mit $fe_{S_j, S_k, \text{relativ}}$ = Relative Feldeffektivität von System S_j
bezogen auf System S_k

$fe_{\text{analyse, absolut, } S_j}$ = Absolute Feldeffektivität im Analysedatensatz
für ein System S_j

$fe_{\text{analyse, absolut, } S_k}$ = Absolute Feldeffektivität im Analysedatensatz
für ein System S_k

5 Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme

Die Bewertungsmethode PreEffect-iFGS wird in Kapitel 4 dargestellt. Auf Basis dieser Erläuterungen erfolgt eine Anwendung des Verfahrens zur Bewertung exemplarischer Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz. Auf der einen Seite wird dargestellt wie die Methode im Entwicklungsprozess Einsatz finden und eine Auslegung integraler Sicherheitssysteme nach deren Feldeffektivität erfolgen kann. Auf der anderen Seite besteht ein weiterer Anwendungsfall in der vergleichenden Bewertung unterschiedlicher Systemstrategien. Zur Verdeutlichung dieser Analysevariante wird die Feldeffektivität einer passiven Fahrzeugauslegung den Ergebnissen von integralen Systemvarianten zum Fußgängerschutz gegenübergestellt. Da im Rahmen des Bewertungsprozesses Erkenntnisse aus der Erprobung zur Berechnung der Feldeffektivität Berücksichtigung erfahren, wird zudem die Anwendung zur Definition eines Testverfahrens für integrale Sicherheitssysteme in Aussicht gestellt.

5.1 Systembewertung im Entwicklungsprozess

Für den Einsatz von PreEffect-iFGS im Entwicklungsprozess nach Abbildung 4-1, dessen Definition in Anlehnung an [HEIBING 2009] erfolgt, werden unterschiedliche Anforderungen an die Bewertungsmethode gestellt. Während der Definitionsphase, in welcher eine Detaillierung der Inhalte aus der Planungsphase erfolgt, existiert ein relativ geringer Erkenntnisstand zum Verhalten der Teilsystemkomponenten, so dass erste Berechnungen zur Feldeffektivität auf Basis idealer Annahmen oder vereinfachter Systemmodelle durchgeführt werden. Während der Realisierungsphase, in welcher eine Umsetzung der Zielvorgaben in serientaugliche Hardwarekomponenten erfolgt, steigen die Informationen zum Systemverhalten auf Grund von Simulationsrechnungen und dem Realtest der Teilsystemkomponenten oder des Gesamtsystems, so dass für eine Bewertung in dieser Phase Erkenntnisse aus der Erprobung integriert werden können.

5.1.1 Definition von Bewertungsfällen in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen

In den frühen Entwicklungsphasen existieren oftmals nur erste Ideen und Grobkonzepte der Gesamtfunktionalität. Der Erkenntnisstand nimmt in den nachfolgenden Phasen zu. Dieser Effekt wird durch das Vorgehen zur Modellbildung der Teilsystemkomponenten berücksichtigt, da eine Integration der Systemkomponenten in PreEffect-iFGS durch ideales Verhalten oder in Form von Modellen bzw. Erkenntnissen aus der realen Erprobung erfolgt. Aus

5. Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme

diesem Grund besteht die Möglichkeit, eine Systembewertung angefangen von den ersten Ideen bis hin zu ausgereiften Funktionskonzepten durchzuführen [SCHRAMM 2009A]. Eine Übersicht exemplarischer Bewertungsfälle ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Auf Grund der unterschiedlichen Charakteristika der Systembausteine in den verschiedenen Bewertungsfällen B1 bis B5 sind diese den zuvor genannten Entwicklungsphasen zuzuordnen. Auf diese Weise wird der jeweils aktuelle Erkenntnisstand zum Gesamtsystemverhalten in jeder Entwicklungsphase berücksichtigt und für eine Analyse der Feldeffektivität einbezogen. Aus diesem strukturierten Bewertungsvorgehen resultiert ein iterativer Prozess zwischen Komponentenentwicklung und Gesamtsystemanalyse und folglich eine Auslegung des integralen Sicherheitssystems nach dessen Feldeffektivität. Dies stellt einen entscheidenden Fortschritt gegenüber den bereits existierenden Bewertungsverfahren aus Kapitel 3 dar und rechtfertigt die Eingliederung von PreEffect-iFGS in den gekoppelten Produktentwicklungs- und Systembewertungsprozess nach Abbildung 4-1.

| Bewertungsfall | Sensorik | Funktionsalgorithmus | Aktorik | Passive Maßnahmen | Umgebung |
|----------------|----------|----------------------|---------|-------------------|----------|
| B1 | Ideal | Ideal | Ideal | Modell | Modell |
| B2 | Modell | Ideal | Modell | Modell | Modell |
| B3 | Modell | Modell | Modell | Modell | Modell |
| B4 | Real | Real | Modell | Modell | Modell |
| B5 | Real | Real | Real | Modell | Modell |

Abbildung 5-1: Exemplarische Bewertungsfälle für den Einsatz von PreEffect-iFGS in verschiedenen Entwicklungsphasen

Die Definition idealer Systemkomponenten zeichnet sich dadurch aus, dass diese immer nach festgelegter Spezifikation agieren. Als Modell integrierte Komponenten liegen Erkenntnisse aus anderen softwarebasierten Entwicklungswerkzeugen zugrunde. Dahingegen erfolgt die Klassifikation real, wenn Informationen aus der realen Erprobung Berücksichtigung erfahren. Die Ausführungen von Kapitel 4 machen deutlich, dass die Modellbildung der Teilsystemkomponenten eine Bewertung analog der drei zuvor genannten Abstraktionsstufen ermöglicht.

Ein ideales Verhalten der Sensorik (Kapitel 4.4.1) charakterisiert sich beispielsweise dadurch, dass der Fußgänger immer erkannt wird, unabhängig davon wie weit dieser vom Fahrzeug entfernt ist oder ob sich dieser hinter einem Sichthindernis befindet. Im Rahmen der Modellbildung werden verschiedene Realisierungen von Sensormodellen in PreEffect-iFGS integriert. Eine Variante ist in Abbildung 4-17 dargestellt. Für den Funktionsalgorithmus (Kapitel 4.4.2) bedeutet ideales Systemverhalten, dass eine Auslösung der Aktorik immer zum spezifizierten Zeitpunkt vor dem Anprall des Fußgängers am Fahrzeug erfolgt. Diese Ausprägung entspricht beispielsweise der Variante Time-To-Collision. Die Einbindung von Algorithmusmodellen, wie diese auch im Realfahrzeug eingesetzt werden, entspricht der Abstraktionsstufe Modell. Eine Berücksichtigung von Erprobungserkenntnissen erfolgt durch die Integration von Auslösezeiten aus dem Realversuch an der Fußgängerschutztestanlage (Abbildung 4-19). Diese Ergebnisse definieren die Auslösezeitpunkte der Aktorik und werden in Kombination mit einer realen Sensorik ermittelt (Abbildung 4-22).

Bei einer Betrachtung der Aktorik des autonomen Bremssystems (Kapitel 4.4.3.2) charakterisiert sich dessen ideale Variante dadurch, dass das Vollverzögerungsniveau ohne Durchlaufen einer Schwellphase erreicht wird. Infolge der Analyse erster Software- oder Hardwareprototypen werden Messergebnisse erzeugt, aus welchen ein spezifischer Verzögerungsgradient abgeleitet und für eine Parametrisierung des Bremsmodells verwendet wird (Abbildung 4-30). Für den Bremsassistenten (Kapitel 4.4.3.1), als zweiten längsdynamischen Aktor, entspricht die ideale Variante einem Erreichen der Vollverzögerung zum Zeitpunkt der ursprünglichen Fahrerbremsung ohne Durchlaufen einer Schwellphase und zudem einer Aktivierung in jeder gebremsten Kollisionssituation. Die Modellvariante des Systems wird durch den Verzögerungsverlauf aus Abbildung 4-25 in Kombination mit einer definierten Aktivierungsrate repräsentiert. Eine Erweiterung der Komponentenerprobung an der Fußgängerschutztestanlage um ein reales autonomes Bremssystem führt zu Bewertungsfall B5. In diesem Fall wird neben dem Aktivierungszeitpunkt die resultierende Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgezeichnet und für eine Ermittlung der Feldeffektivität in PreEffect-iFGS integriert.

Die beiden Komponenten passive Maßnahmen und Umgebung sind in Abbildung 5-1 immer als Modell ausgeführt. Die modellierte Umgebung definiert sich aus den Informationen der Realunfalldatenbank und der daraus generierten Simulationsdatenbasis (Kapitel 4.3). Theoretisch ist eine ideale Ausprägung denkbar, indem beispielsweise für jeden Unfall ein maximaler Reibwert unterstellt wird. Dies ist nicht zielführend, da dieser Schritt das reale Feldgeschehen und folglich die Bewertungsgrundlage verändert. Ähnlich stellt es sich für die passiven Maßnahmen dar. Fahrzeuge besitzen immer einen definierten Stand an passiver Sicherheit, welcher sich an der tatsächlich zu erwartenden Auslegung orientieren und im Modell widerspiegeln sollte. Wie in Kapitel 4.7.2 dargestellt, erfolgt eine Berücksichtigung der

passiven Fahrzeugausstattung im Rahmen der Umrechnung von Kollisionsgeschwindigkeit und Fußgängeralter aus den veränderten Unfallsituationen in Verletzungsschweren. Daraus wird deutlich, dass eine Abweichung des Modells von der Realität in Richtung eines idealen Verhaltens zu einer Verzerrung der Verletztenanzahl und folglich der Feldeffektivität führt.

5.1.2 Bewertungsergebnisse für ausgewählte Systemausprägungen

Für die Durchführung einer Systembewertung mit PreEffect-iFGS wird die exemplarische Bewertungsmatrix aus Abbildung 5-1 mit konkreten Systemausprägungen und Realisierungen der Teilsystemkomponenten hinterlegt. Diese sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Für ausgewählte Systemausprägungen erfolgen zudem eine Berechnung der veränderten Kollisionssituationen und eine Interpretation der ermittelten Ergebnisse. Die Systemausprägung S0 zeichnet sich dadurch aus, dass neben einer passiven Fahrzeugausstattung von modellierten 18 EuroNCAP-Bewertungspunkten (Abbildung 4-45) keine weiteren aktiven Teilsystemkomponenten für die Analysen einbezogen werden. Ferner bildet diese passive Fahrzeugausstattung die Basis für alle folgenden Systemvarianten in Abbildung 5-2. Eine Umrechnung der veränderten Kollisionsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Fußgängeralters in Verletzungsschweren erfolgt unter Berücksichtigung von Gl. 4-16 und den entsprechenden Regressionsparametern nach Abbildung 4-47. Das Modell der Unfallwelt bilden für diesen und alle weiteren Bewertungsfälle die Simulationsszenarien des Analysedatensatzes. Dieser Einflussfaktor ist in Abbildung 5-2 nicht dargestellt.

Die Realisierung S1 ergänzt die vorherige Systemausprägung S0 um eine zusätzliche Betrachtung des Bremsassistenten. Dessen Auswirkungen auf die ursprünglichen Kollisionssituationen wird durch das Modell nach Abbildung 4-25 berechnet. Die Definition der Auslöseschwelle erfolgt durch die Vorgabe einer Mindestbremsverzögerung von $5,0 \text{ m/s}^2$ im Ursprungsunfall. Die Wirkung des Systems wird daher für alle Einzelunfälle des Analysedatensatzes angenommen, in welchen die Fahrerverzögerung diesen Grenzwert überschreitet. Die Aktivierungsrate entspricht damit einem Anteil von etwa 50% (Abbildung 2-10). In der Systemvariante S2 wird zusätzlich zum Bremsassistenten das Modell einer autonomen Bremse mit einem Verzögerungsgradienten von etwa 90 m/s^3 in die Bewertung einbezogen. Die Aktivierung dieses Systems erfolgt in allen Einzelfällen zu einer spezifizierten Time-To-Collision von 200 ms als ideale Ausprägung des Funktionsalgorithmus. Die Aktivierungsrate von Hundertprozent resultiert aus der idealen Sensorik, wodurch immer eine rechtzeitige Erkennung des Fußgängers unterstellt wird. Daher ist der Fußgänger 200 ms vor der Kollision immer erkannt, auch wenn sich dieser hinter einem Sichthindernis befindet. Folglich ist eine Berücksichtigung der Komponente Sensorik für die operative Systembewertung in diesem Fall nicht erforderlich.

5. Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme

| Systemausprägung | Sensorik | Funktionsalgorithmus | Aktorik | | Passive Maßnahmen |
|------------------|---|----------------------|------------------------------------|--------|-------------------|
| S0 | - | - | - | | Modell |
| | - | - | - | | 18 Punkte |
| S1 | - | - | Modell | | Modell |
| | - | - | Bremsassistent (BAS) | | 18 Punkte |
| S2 | Ideal | Ideal | Modell | Modell | Modell |
| | - | TTC ₂₀₀ | Autonome Bremse grad ₉₀ | BAS | 18 Punkte |
| S3 | Modell | Ideal | Modell | Modell | Modell |
| | Sensor A | TTC ₂₀₀ | Autonome Bremse grad ₃₀ | BAS | 18 Punkte |
| S4 | Modell | Ideal | Modell | Modell | Modell |
| | Sensor B | TTC ₂₅₀ | Autonome Bremse grad ₃₀ | BAS | 18 Punkte |
| S5 | Modell | Modell | Modell | Modell | Modell |
| | Sensor C | Algorithmus C | Autonome Bremse grad ₃₀ | BAS | 18 Punkte |
| S6 | Real | | Modell | Modell | Modell |
| | Auslösezeiten aus Erprobung | | Autonome Bremse grad ₃₀ | BAS | 18 Punkte |
| S7 | Real | | | Modell | Modell |
| | Geschwindigkeitsreduktion aus Erprobung | | | BAS | 18 Punkte |

Abbildung 5-2: Übersicht exemplarischer Systemausprägungen mit verschiedenen Realisierungen der Teilsystemkomponenten

Für die Systemspezifikation S3 erfolgt eine Berechnung der Feldeffektivität unter Einbezug eines Sensormodells A nach Abbildung 5-3. Der Funktionsalgorithmus ist weiterhin ideal durch eine Aktivierung 200 ms vor Kollision ausgeführt. Eine Auslösung des autonomen Bremssystems erfolgt in diesem Fall nur, wenn der Fußgänger durch das Sensormodell zur definierten Time-To-Collision bereits erkannt ist, so dass dieses im Idealfall zum spezifizierten oder einem späteren Zeitpunkt aktiviert wird. Das Bremssystem ist in der Systemvariante S3 durch ein Modell mit einem Verzögerungsgradienten von etwa 30 m/s^3 berücksichtigt. Eine Aktivierung des Bremsassistenten erfolgt analog der beiden vorherigen Varianten und unter Berücksichtigung der Ausführungen in Kapitel 4.4.3.3 für eine kombinierte Bewertung beider Akteure.

| Sensorparameter | Ausprägung Sensormodell A | Ausprägung Sensormodell B |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Reichweite [m] | 20 | 30 |
| Öffnungswinkel [Grad] | 30 | 40 |
| Blickrichtung [Grad] | 0 | 0 |
| Verbauort | Fahrzeugfront | Fahrzeugfront |
| Berücksichtigung Sichthindernis | ja | ja |

Abbildung 5-3: Parameter für die Modelle der Sensorik A und Sensorik B für die Systemausprägungen S3 und S4

Ähnlich stellt es sich für die Ausprägung S4 dar, mit dem Unterschied, dass ein verändertes Sensormodell B nach Abbildung 5-3 und eine Time-To-Collision zur Aktivierung des autonomen Bremssystems von 250 ms verwendet werden. Die Systemausprägung S5 charakterisiert sich dadurch, dass anstelle der idealen Aktivierung des autonomen Bremssystems bei gegebener Time-To-Collision das Modell eines Funktionsalgorithmus C, wie es auch im Realfahrzeug Einsatz findet, implementiert wird. In diesem Fall erfolgt eine Berechnung der Auslösezeitpunkte für jeden Einzelfall der Simulationsdatenbasis auf Basis der Objektlisten eines Sensormodells C, welche im Algorithmusmodell C ausgewertet werden.

Eine weitere Erhöhung der Realitätsnähe erreicht die Systemausprägung S6. In diesem Fall erfolgt eine Substitution der Modelle von Sensorik und Funktionsalgorithmus durch real ermittelte Auslösezeiten. Für die Einbindung dieser Aktivierungszeitpunkte werden in einem vorgelagerten Schritt die aufgezeichneten Daten des Sensors C für die 45 Testfälle aus Abbildung 4-21 im Modell des Funktionsalgorithmus C (Systemausprägung S5) ausgewertet und die korrespondierenden Aktivierungszeitpunkte, basierend auf realen Sensor-

informationen, ermittelt. In Kapitel 4.4.2 wird erläutert, dass die Anzahl der Testfälle nicht ausreicht, um die Auslösezeitpunkte auf alle Einzelunfälle der Simulationsdatenbasis zurückzuspiegeln. Diese Herausforderung erfordert die Definition einer exemplarischen Abbildungsvorschrift nach Abbildung 5-4. Durch diese erfolgt ein Übertragen der ermittelten Auslösezeitpunkte aus dem Versuch auf ähnliche Unfallkonstellationen der Simulationsdatenbasis. Die Auslösezeit des ersten Testfalls FG01/20/05/links wird beispielsweise auf Einzelunfälle übertragen, welche den sensoräquivalenten Unfalltypen 100.07-11 bzw. 111.01-05 zugeordnet sind (Abbildung 4-20), eine Ausgangsgeschwindigkeit $v_{0,fzg}$ von 1 bis 30 km/h bzw. $v_{0,fg}$ von 1 bis 7 km/h besitzen und der Fußgänger linksseitig angeprallt ist. Dieses Vorgehen erfolgt für die verbleibenden 44 Testfälle analog Abbildung 5-4.

| Test-szenario | Versuchsaufbau | Zuordnung zu Einzelunfällen |
|---------------|---|---|
| | $v_{0,fzg}$ [km/h] / $v_{0,fg}$ [km/h] / Anprallort | $v_{0,fzg}$ [km/h] / $v_{0,fg}$ [km/h] / Anprallort |
| FG_01 | 20 / 05 / links, rechts, mittig | 01-30 / 01-07 / links, rechts, mittig |
| | 20 / 10 / links, rechts, mittig | 01-30 / 08-18 / links, rechts, mittig |
| | 40 / 05 / links, rechts, mittig | 31-55 / 01-07 / links, rechts, mittig |
| | 40 / 10 / links, rechts, mittig | 31-55 / 08-18 / links, rechts, mittig |
| | 70 / 05 / links, rechts, mittig | 56-90 / 01-07 / links, rechts, mittig |
| | 70 / 10 / links, rechts, mittig | 56-90 / 08-18 / links, rechts, mittig |
| FG_02 | 20 / 05 / links, rechts, mittig | 01-30 / 01-07 / links, rechts, mittig |
| | 20 / 10 / links, rechts, mittig | 01-30 / 08-18 / links, rechts, mittig |
| | 40 / 05 / links, rechts, mittig | 31-55 / 01-07 / links, rechts, mittig |
| | 40 / 10 / links, rechts, mittig | 31-55 / 08-18 / links, rechts, mittig |
| | 70 / 05 / links, rechts, mittig | 56-90 / 01-07 / links, rechts, mittig |
| | 70 / 10 / links, rechts, mittig | 56-90 / 08-18 / links, rechts, mittig |
| FG_03 | 30 / 0 / links, rechts, mittig | 01-40 / 0 / links, rechts, mittig |
| | 50 / 0 / links, rechts, mittig | 41-60 / 0 / links, rechts, mittig |
| | 70 / 0 / links, rechts, mittig | 61-90 / 0 / links, rechts, mittig |

Abbildung 5-4: Exemplarische Abbildungsvorschrift zur Rückspiegelung der Auslösezeiten auf die Einzelunfälle des Analysedatensatzes

Für eine Validierung des Vorgehens zur Rückspiegelung der Testergebnisse in die Simulationsdatenbasis können die 45 Testszenarien aus Abbildung 4-21 in der Simulationsumgebung nachgebildet und die entsprechenden Aktivierungszeitpunkte für die Systemvariante S5 bestimmt werden. Aus einem Übertrag dieser 45 virtuell ermittelten Auslösezeiten auf die Einzelunfälle analog Abbildung 5-4 resultieren Informationen darüber, ob sich die Abbildungsvorschrift als valide darstellt. Zudem besteht durch diesen Schritt die Möglichkeit, einen Abgleich des Sensormodells C mit der realen Komponente durchzuführen.

5. Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme

Dem vollständigen Realtest entspricht die Systemausprägung S7. In dieser Variante erfolgt neben den Komponenten Sensorik und Funktionsalgorithmus auch eine Erprobung des autonomen Bremssystems an der Fußgängerschutzanlage und eine Aufzeichnung der erzielten Geschwindigkeitsreduktionen in den 45 Testfällen. Eine Rückspiegelung dieser realen Messgrößen auf die Einzelunfälle entspricht dem Vorgehen zur Rückübertragung der Auslösezeiten nach Abbildung 5-4 in der zuvor erläuterten Systemvariante S6.

Die berechneten absoluten Feldeffektivitäten für die fünf eben dargelegten Systemausprägungen S0 bis S4 aus Abbildung 5-2 sind in Abbildung 5-5 dargestellt. Darüber hinaus zeigen Abbildung 5-6 bzw. Abbildung 5-7 die Veränderungen in den Kollisionsgeschwindigkeitsverteilungen. Abbildung 5-5 ist zu entnehmen, dass mit dem modellierten EuroNCAP-Testergebnis von 18 Punkten nach Abbildung 4-45 eine absolute Feldeffektivität von etwa 10% im Fußgänger-Pkw-Datensatz erreicht wird. Da in diesem Fall eine ausschließliche Bewertung von passiven Maßnahmen erfolgt, entspricht die Geschwindigkeitsverteilung in Abbildung 5-6 der unveränderten Simulationsdatenbasis des Analysedatensatzes.

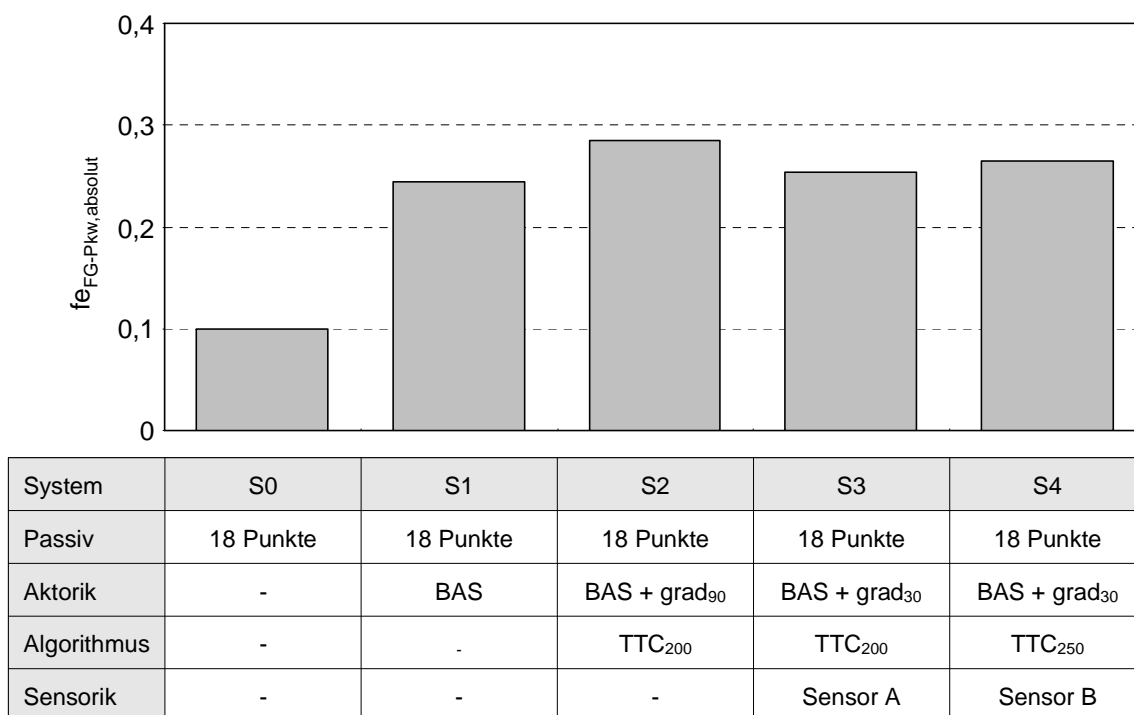


Abbildung 5-5: Absolute Feldeffektivitäten für die Systemausprägungen S0 bis S4 bezogen auf den Fußgänger-Pkw-Datensatz

Durch den zusätzlichen Einsatz eines Bremsassistenten erfolgt eine deutliche Erhöhung der Feldeffektivität für die Systemausprägung S1. Die Aktivierungsrate von etwa 50% ist in Abbildung 5-7 zu erkennen, da in etwa der Hälfte der Unfälle keine Kollisionsgeschwindigkeitsreduktion erfolgt. Ferner zeigt Abbildung 5-6, dass mit diesem System rund 17% der Unfälle in der Simulationsdatenbasis vermieden werden. Darin ist sowohl die räumliche als

auch zeitliche Vermeidung enthalten (Kapitel 4.5.1.1). Einer Betrachtung der Resultate für die Systemausprägungen S2 bis S4 ist zu entnehmen, dass durch den Einsatz zusätzlicher aktiver Teilsystemkomponenten eine weitere Erhöhung der Feldeffektivität erreicht wird. Den größten Zugewinn an Feldeffektivität zeigt Variante S2, in welcher eine Aktivierung des autonomen Bremssystems in jedem Fall des Analysedatensatzes 200 ms vor Kollision erfolgt. Abbildung 5-6 ist zu entnehmen, dass mit dieser Systemvariante nur noch wenige Kollisionen zusätzlich vermieden werden, aber in allen Fällen eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit erfolgt (Abbildung 5-7). Aus diesem Effekt resultiert die erhöhte Feldeffektivität gegenüber der Systemausprägung S1, wie in Kapitel 4.7.2 erläutert.

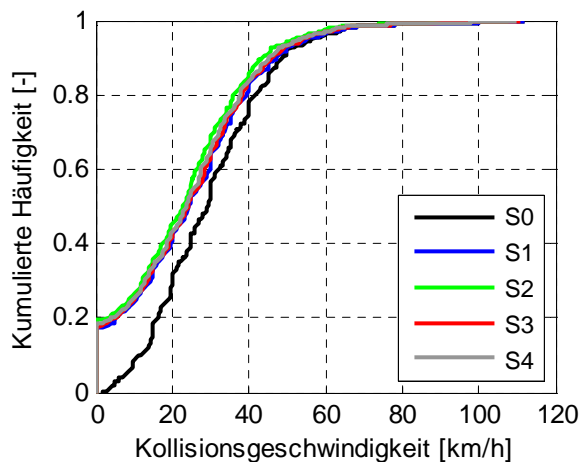


Abbildung 5-6: Kumulierte Häufigkeit der Kollisionsgeschwindigkeiten für die Systemvarianten S0 bis S4

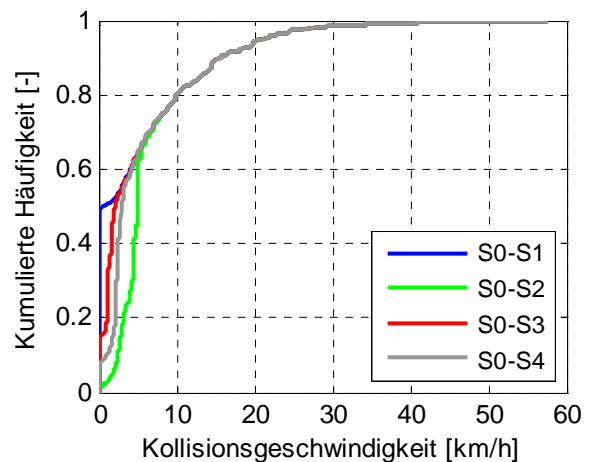


Abbildung 5-7: Kumulierte Häufigkeit der Kollisionsgeschwindigkeitsreduktionen für die Systemvarianten S1 bis S4

Die Berücksichtigung eines Sensormodells und weniger leistungsfähigen autonomen Bremssystems in der Ausprägung S3 führt zu einer Reduktion der Feldeffektivität gegenüber der Variante S2, da zum einen der Fußgänger nicht mehr in jedem Einzelunfall immer 200 ms vor der Kollision erkannt wird und zum anderen die Schwellphase bis zum Erreichen der Konstantverzögerung ansteigt. Der Anteil verhinderter Kollisionen liegt unter der Systemvariante S2 (Abbildung 5-6) ebenso wie der Anteil an Kollisionen, in welchen eine Reduktion der Anprallgeschwindigkeit erfolgt (Abbildung 5-7). In der Systemvariante S4 erfolgt der Einbezug eines Sensormodells B mit vergrößertem Sichtbereich und ein Funktionsalgorithmus mit idealer Aktivierung zu einer Time-To-Collision von 250 ms. In dieser Ausprägung ist wieder ein leichter Anstieg der Feldeffektivität zu erkennen. Die Kollisionsgeschwindigkeitsverteilungen in Abbildung 5-6 bzw. Abbildung 5-7 zeigen ein Resultat, welches zwischen den beiden Systemvarianten S2 und S3 liegt. Die Erkenntnisse und Interpretationen, welche aus den Bewertungsergebnissen für die Systemausprägungen S5 bis S7 abgeleitet werden können, entsprechen von Prinzip her denjenigen aus den Varianten S0 bis S4, so dass eine Darstellung dieser Ergebnisse nicht erfolgt.

Die oben dargelegten Erkenntnisse aus einer Bewertung der Systemausprägungen S0 bis S4 machen deutlich, dass mit der Bewertungsmethode PreEffect-iFGS die Möglichkeit besteht, eine strukturierte Bewertung integraler Sicherheitssysteme durchzuführen und den Einfluss der Teilsystemkomponenten auf die Feldeffektivität zu quantifizieren. Als Konsequenz erfolgt mit PreEffect-iFGS eine Auslegung integraler Sicherheitssysteme nach deren Feldeffektivität und somit Leistungsfähigkeit im Realunfallgeschehen. Durch den Umstand, auch Erprobungserkenntnisse in die Bewertung integrieren zu können (Systemvarianten S6 und S7), resultiert eine sehr hohe Ergebnisqualität und Realitätsnähe, welche in den bisherigen Bewertungsverfahren aus Kapitel 3 nicht erreicht wird.

5.2 Systembewertung zum Nachweis einer äquivalenten Feldeffektivität und zur Definition von Testverfahren

Die Ausführungen von Kapitel 5.1 machen den Einsatz von PreEffect-iFGS im Entwicklungsprozess und die daraus ableitbaren Erkenntnisse deutlich. In diesem Rahmen erfolgt eine Berechnung der Feldeffektivität für unterschiedliche Systemausprägungen, indem ausgehend von einer passiven Fahrzeugauslegung zunehmend aktive Komponenten hinzugefügt oder in deren Spezifikation verändert werden. Die Erkenntnisse aus Abbildung 5-5 zeigen auch, dass durch unterschiedliche Systemausprägungen ähnliche Feldeffektivitäten erreicht werden können. Für die Analyse welche andere Systemstrategie eine Feldeffektivität äquivalent zu den integralen Systemausprägungen S2 bis S4 erzielt, erfolgt eine Definition von zwei weiteren Systemvarianten nach Abbildung 5-8.

| Systemausprägung | Sensorik | Funktionsalgorithmus | Aktorik | Passive Maßnahmen |
|------------------|----------|----------------------|----------------------|-------------------|
| S8 | - | - | - | Modell |
| | - | - | - | 24 Punkte |
| S9 | - | - | Modell | Modell |
| | - | - | Bremsassistent (BAS) | 24 Punkte |

Abbildung 5-8: Übersicht exemplarischer Systemausprägungen mit Realisierungen der Teilsystemkomponenten für eine passive Fahrzeugausstattung von modellierten 24 EuroNCAP-Punkten

In der Variante S8 wird eine Fahrzeugausstattung mit modellierten passiven Schutzmaßnahmen von 24 EuroNCAP-Punkten analog dem Testergebnis nach Abbildung 4-46 festgelegt. Die Ausprägung S9 berücksichtigt zusätzlich das Modell eines Bremsassistenten. Dessen Aktivierung erfolgt mit einer Auslöserate von 50%, analog den Systemvarianten S1 bis S4 aus Abbildung 5-2.

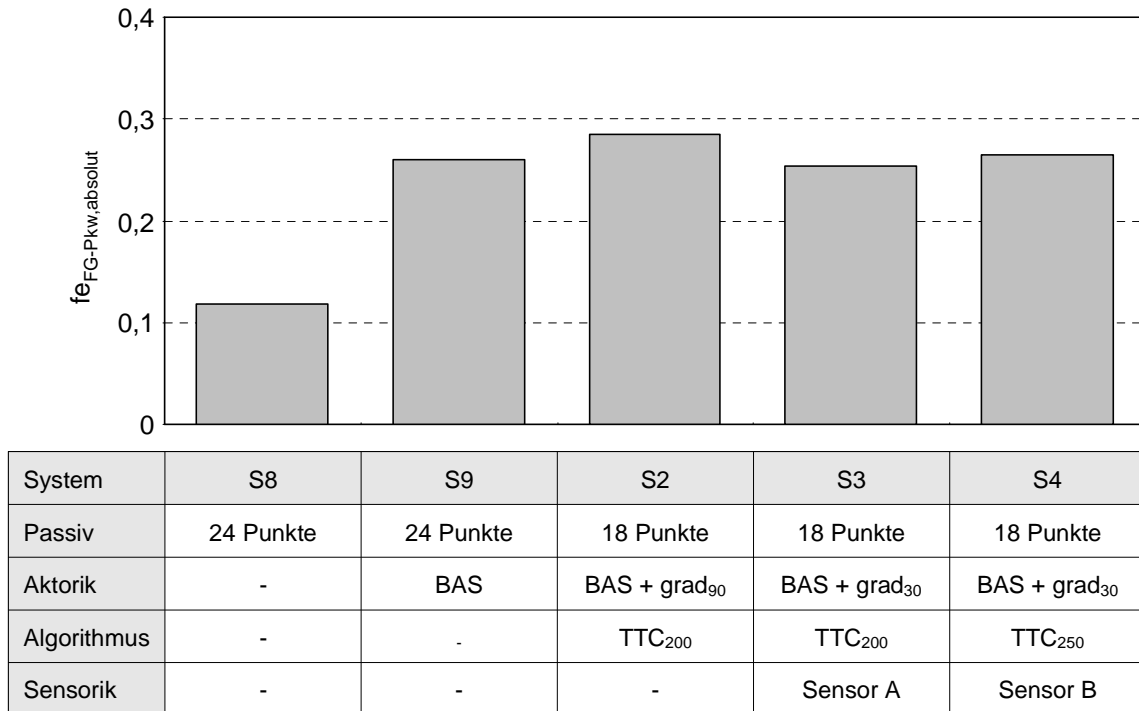


Abbildung 5-9: Absolute Feldeffektivitäten für die Systemausprägungen S8 bzw. S9 und S2 bis S4 bezogen auf den Fußgänger-Pkw-Datensatz

Die modellierte Unfallwelt bilden auch hier die Simulationsszenarien der Einzelunfälle aus dem Analysedatensatz. Die resultierenden absoluten Feldeffektivitäten der Systemausprägungen S8 und S9, bezogen auf den Fußgänger-Pkw-Datensatz, zeigt Abbildung 5-9. Darin sind ebenfalls die Ergebnisse für die Systeme S2 bis S4 aus Abbildung 5-2 dargestellt. Die absolute Feldeffektivität der Systemvariante S8 liegt über dem Resultat der Variante S0 in Abbildung 5-9, welcher nur eine passive Fahrzeugausstattung von modellierten 18 EuroNCAP-Punkten zugrunde liegt. Dieses Ergebnis ist nach den Erläuterungen zu den korrespondierenden Verletzungsrisikofunktionen in Kapitel 4.6.2.3 zu erwarten. Da auch in diesem Fall die ursprünglichen Unfallkonstellationen der Simulationsdatenbasis nicht verändert werden, entspricht die Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit für die Systemausprägung S8 der Variante S0 in Abbildung 5-6.

5. Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme

Ähnlich stellt es sich für die Systemausprägungen S1 und S9 dar, da aus den identischen Aktivierungsannahmen für den Bremsassistenten auch äquivalente Veränderungen der ursprünglichen Unfallsituationen erfolgen. Die Ergebnisse in Abbildung 5-6 bzw. Abbildung 5-7 für die Ausprägung S9 entsprechen folglich der Variante S1. Die höhere absolute Feldeffektivität für die Systemausprägung S9 ergibt sich folglich rein aus dem modellierten passiven Schutzniveau, welches durch die entsprechenden Regressionsparameter in der Verletzungsrisikofunktion repräsentiert wird. Zu beachten ist, dass die Differenz der absoluten Feldeffektivitäten zwischen den Systemausprägungen S0 und S8 bzw. S1 und S9 nicht identisch ist, da beide Verletzungsrisikofunktionen über die betrachteten Geschwindigkeits- und Fußgängeraltersbereiche unterschiedliche Verläufe aufweisen.

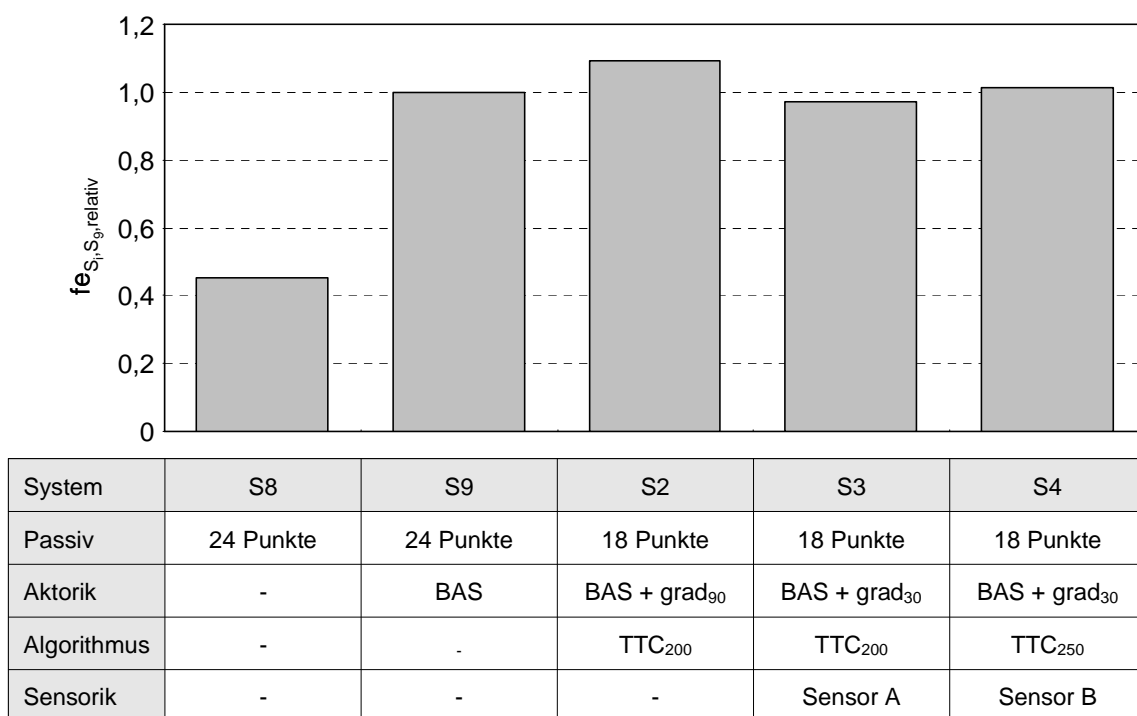


Abbildung 5-10: Relative Feldeffektivitäten für die Systemausprägungen S8 bzw. S9 und S2 bis S4 bezogen auf die Feldeffektivität der Variante S9

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse aus Abbildung 5-9 erfolgt in Abbildung 5-10 eine Darstellung der relativen Feldeffektivitäten. Das Referenzsystem bildet die Variante S9 mit einer passiven Fahrzeugausstattung von modellierten 24 EuroNCAP-Punkten in Kombination mit dem Bremsassistenten. Eine Betrachtung der relativen Feldeffektivität der Variante S8 zeigt, dass eine reine passive Fahrzeugauslegung mit modellierten 24 EuroNCAP-Punkten im Vergleich zum Referenzsystem mit zusätzlicher Ausstattung eines Bremsassistenten weniger als ein halb so gutes Resultat erzielt. Der Systemvariante S2 liegt ein passiver Stand von modellierten 18 EuroNCAP-Punkten, ein Bremsassistent und weitere aktive Teilsystemkomponenten zugrunde. Es ist zu erkennen, dass durch eine Aktivierung des autonomen Bremssystems in jedem Einzelunfall 200 ms vor

Kollision eine höhere Feldeffektivität erzielt wird als mit der Variante S9. Die geringere absolute Feldeffektivität aus dem Vergleich von Systemausprägung S9 mit S1, welche aus den unterschiedlichen passiven Fahrzeugausstattungen resultiert, wird durch eine zusätzliche Minderung der Kollisionsgeschwindigkeit infolge aktiver Systembausteine kompensiert. Dies zeigt die höhere absolute Feldeffektivität der Variante S2 gegenüber dem Referenzsystem.

Die Berücksichtigung eines Sensormodells und autonomen Bremssystems mit reduzierter Leistungsfähigkeit in der Ausprägung S3 hat zwei Konsequenzen. Zum einen, dass das autonome Bremssystem nicht mehr in jedem Unfall zu einer Time-To-Collision von 200 ms auslöst und zum anderen, dass für ein Erreichen des Vollverzögerungsniveaus eine zeitlich verlängerte Schwellphase zu durchlaufen ist. Der verringerte Abbau an Kollisionsgeschwindigkeit führt zu einer relativen Feldeffektivität, welche unter dem Wert der Systemausprägung S9 liegt. Auf Grund einer Vergrößerung des Sichtbereichs im Sensormodell und Erhöhung der Auslösezeit für den idealen Funktionsalgorithmus auf maximal 250 ms vor Kollision in der Systemvariante S4 resultiert eine Feldeffektivität, welche die des Referenzsystems S9 übersteigt. Das bedeutet, in dieser Systemvariante erfolgt die erneute Kompensation des Effektes einer verringerten passiven Fahrzeugausstattung durch die aktiven Teilsystemkomponenten.

Diese Art der Anwendung von PreEffect-iFGS verdeutlicht, dass neben einer Auslegung integraler Sicherheitssysteme an deren absoluten Feldeffektivität, auch die Leistungsfähigkeit verschiedener Systemstrategien im Realunfallgeschehen vergleichend bewertet werden kann. Folglich schafft PreEffect-iFGS die Möglichkeit den Nachweis zu führen, dass unterschiedliche Systemstrategien eine äquivalente Feldeffektivität erzielen und daher als gleichwertig zu betrachten sind.

Für integrale Systeme existieren derzeit weder in Verbraucherschutztests noch in der Gesetzgebung Verfahren für eine Bewertung derartiger Sicherheitsmaßnahmen. Die Bewertung von passiven Schutzmaßnahmen erfolgt dagegen nach etablierten Methoden, wie zum Beispiel in den Komponentenversuchen nach [EURONCAP 2009] oder [EUROPÄISCHE UNION 2009]. Eine Vorgehensweise zur Integration der Ergebnisse aus dem Testverfahren nach [EURONCAP 2009] in PreEffect-iFGS und Berechnung der entsprechenden Feldeffektivität einer passiven Fahrzeugauslegung ist in Kapitel 4.6.2.2 beschrieben. Darauf basierend sind beliebige passive Referenzsysteme definierbar und mit aktiven Komponenten, wie dem Bremsassistenten, kombinierbar. Die berechnete Feldeffektivität des Referenzsystems kann somit als Anforderung definiert werden, welche von einem integralen Sicherheitssystem zu erreichen ist, um eine äquivalente Berücksichtigung im Bewertungsprozess zu erfahren.

Die Berechnung der Feldeffektivität des integralen Systems ist sowohl rein simulativ, wie in der Systemausprägung S5 nach Abbildung 5-2 dargestellt, als auch unter Berücksichtigung von Erprobungsergebnissen analog den Systemausprägungen S6 bzw. S7 durchführbar. Im zweiten Fall erfolgt zunächst eine Ermittlung der Aktivierungszeitpunkte (Systemvariante S6) oder Geschwindigkeitsreduktionen (Systemvariante S7) in einem Realtest, beispielsweise für die 45 Testszenarien aus Abbildung 4-21 an der Fußgängerschutztestanlage nach Abbildung 4-19. Die aufgezeichneten Messgrößen werden in einem Folgeschritt durch eine Abbildungsvorschrift, wie exemplarisch in Abbildung 5-4 dargestellt, in PreEffect-iFGS integriert und die Feldeffektivität berechnet. Ebenso besteht die Möglichkeit mit PreEffect-iFGS den umgekehrten Fall zu realisieren. Hierfür werden im Vorfeld Grenzwerte für die Aktivierungszeitpunkte oder Geschwindigkeitsreduktionen festgelegt, welche in einem Realtest zu erreichen sind, um die äquivalente Feldeffektivität eines Referenzsystems nachzuweisen. Durch eine Gegenüberstellung der ermittelten Feldeffektivitäten erfolgt somit eine objektive Bewertung von verschiedenen Systemstrategien hinsichtlich äquivalenter Leistungsfähigkeit im Realunfallgeschehen, unter Berücksichtigung von Erprobungsergebnissen sowohl für die aktiven als auch passiven Teilsystemkomponenten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Fußgängerunfall stellt sowohl in Europa als auch weltweit ein bedeutendes Feld der Fahrzeugsicherheit dar. Im Jahr 2003 wurde daher vom Europäischen Parlament und dem Rat der Europäischen Union eine erste Gesetzesphase erlassen, welche die Gestaltung der Fahrzeugfront bezüglich deren Kompatibilität bei einem Fußgängeranprall bewertet. Auch in Verbraucherschutztests, wie dem EuroNCAP, erfolgt eine Analyse des fahrzeugseitigen Fußgängerschutzes im Rahmen des Bewertungsprozesses. In beiden Fällen wird das passive Sicherheitsniveau durch Komponentenversuche an der Fahrzeugfront quantifiziert. Aus dem Trend der integralen Fahrzeugsicherheit resultiert eine gesamtheitliche Betrachtung der Unfallsituation, mit dem Ziel eine optimale Schutzwirkung zu erzielen. Diese Entwicklung wurde auch in der zweiten Phase der europäischen Gesetzgebung zum Fußgängerschutz berücksichtigt. Darin wird in Aussicht gestellt, dass Fahrzeuge, welche mit einem Kollisionsvermeidungssystem ausgestattet sind, die passiven Testvorschriften nicht erfüllen müssen, wenn eine äquivalente Feldeffektivität beider Schutzmaßnahmen nachgewiesen wird. Die Darstellung einer Bewertungsmethode erfolgt nicht.

Die Analyse veröffentlichter Bewertungsmethoden, welche auf einer Einzelfallanalyse basieren, ergab, dass sich keines der existierenden Verfahren für eine Bewertung integraler Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz, mit den geforderten Ansprüchen an Realitätsnähe bzw. einem Einsatz im Entwicklungsprozess, als geeignet darstellt. Dies zeigt sich sowohl in der Art der Systemmodellierung als auch im Vorgehen zur Berechnung der resultierenden Verletzungsschweren aus den veränderten Unfallsituationen infolge des Systemeingriffs. Die Verfahren eignen sich vielmehr für eine grobe Abschätzung des Sicherheitsgewinns in der Planungsphase. Aus diesem Grund erfolgte die Entwicklung der Bewertungsmethode PreEffect-iFGS, um die Feldeffektivität integraler Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz und damit Leistungsfähigkeit im Realunfallgeschehen zu berechnen. Dabei handelt es sich um ein prospektives Verfahren, welches die Feldeffektivität durch eine unfallindividuelle Analyse der Systemwirkungsweise bestimmt. Das Ziel von PreEffect-iFGS besteht darin, integrale Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz im Entwicklungsprozess bewerten zu können, um eine Auslegung der Systeme nach deren Feldeffektivität vorzunehmen. Darüber hinaus wurde die Anforderung an PreEffect-iFGS gestellt, unterschiedliche Sicherheitsmaßnahmen zum Fußgängerschutz nach deren Feldeffektivität vergleichend bewerten zu können, um eine äquivalente Feldeffektivität nachzuweisen und die Generierung von Testverfahren für integrale Sicherheitssysteme in Aussicht zu stellen.

Die Bewertung der Systeme erfolgt auf Basis von Unfalldaten, welche ein Abbild der realen Fußgängerunfallwelt darstellen. Eine Analyse verfügbarer Datenbanken hat ergeben, dass

der Detaillierungsgrad nationaler Verkehrsunfallstatistiken nicht ausreicht, um wissenschaftliche Analysen zur Wirkungsweise integraler Systeme auf Basis einer Einzelfallanalyse durchzuführen. Daher werden in dieser Arbeit die Fußgängerunfälle einer In-Depth-Datenbank in PreEffect-iFGS integriert. Derzeit werden von den Datenbanken noch keine Simulationsszenarien für die dokumentierten Kollisionen bereitgestellt, sondern eine Sammlung von Parametern, welche die Unfallsituation detailliert beschreiben. Um aus diesen Informationen Simulationsszenarien zu erstellen, wurde ein Vorgehen entwickelt, welches auf Basis definierter Unfallparameter die ursprüngliche Kollisionssituation automatisiert nachbildet. Diese Szenarien bilden die Grundlage für eine Berechnung der Feldeffektivität integraler Sicherheitssysteme zum Fußgängerschutz.

Die Strategie der integralen Fahrzeugsicherheit führt dazu, dass eine Vielzahl theoretisch möglicher Systemkombinationen existiert. Für eine Umsetzung in PreEffect-iFGS erfolgte daher eine Eingrenzung der Systeme mit Wirkungsweise in der Pre-Crash- und Crash-Phase. Daher setzt sich deren Aufbau aus den aktiven Teilsystemkomponenten Sensorik, Funktionsalgorithmus und Aktorik bzw. der passiven Fahrzeugausstattung zusammen. Ferner wird die Integration von Aktoren auf Bremssysteme eingeschränkt. Durch die entwickelten Modelle zur Einbindung der aktiven und passiven Teilsystemkomponenten in PreEffect-iFGS erfolgt eine Berücksichtigung von verschiedenen Ausprägungen der Systembausteine. Diese erstrecken sich von einem idealen Verhalten über Modelle bis hin zu einer Einbindung von realem Systemverhalten.

Zur Berechnung der neuen Kollisionssituationen infolge der Systemwirkung integraler Fußgängerschutzsysteme erfolgte die Entwicklung von zwei globalen Simulationsverfahren, bezeichnet als PreEffect-Open-Loop und -Closed-Loop. In beiden erfolgt eine unfallindividuelle Auswertung der aktiven Teilsystemkomponenten des integralen Systems. Die Ergebnisse dieser Prozessschritte werden an ein Softwareprogramm übergeben, welches sich als Standardlösung im Bereich der Unfallforschung und -rekonstruktion durchgesetzt hat. Darin erfolgt eine Berechnung der veränderten Kollisionssituationen. Die beiden Verfahren unterscheiden sich bezüglich Rechenaufwand und Ergebnisqualität, so dass der Einsatz des jeweiligen Verfahrens in Abhängigkeit der zu analysierenden Systemausprägung erfolgt.

Auf Basis der veränderten Kollisionssituationen werden die resultierenden Verletzungsschweren der Fußgänger berechnet. Für dieses Vorgehen erfolgt der Einsatz von Verletzungsrisikofunktionen. Als Verfahren für deren Generierung wird die multiple binärlogistische Regressionsanalyse herangezogen. Zur Validierung der Ergebnisse des Regressionsmodells erfolgt zusätzlich der Einsatz nicht parametrischer Verfahren und eine sachlogische Plausibilisierung des Regressionsmodells. Im Rahmen der Erzeugung von Verletzungsrisikofunktionen werden die Unfalldaten gezielt analysiert, um die relevanten Ein-

flussfaktoren auf die Fußgängerverletzungsschwere zu identifizieren. Die Untersuchungen ergaben, dass die Kollisionsgeschwindigkeit und das Fußgängeralter signifikanten Einfluss auf die Verletzungsschwere besitzen. Die Berücksichtigung fahrzeugseitiger passiver Maßnahmen zum Fußgängerschutz als Teil des integralen Gesamtsystems erfolgt ebenfalls im Prozessschritt der Transformation von veränderten Unfallsituationen in Verletzungsschweren. Deren Güte wird durch Bewertungsergebnisse nach dem Fußgängerschutz-Testprotokoll des EuroNCAP quantifiziert.

Eine Erläuterung der neuen Bewertungsmöglichkeiten durch den Einsatz von PreEffect-iFGS erfolgt an zwei exemplarischen Anwendungsfällen. Auf der einen Seite wird der Einsatz der Methode im Entwicklungsprozess dargestellt. Daraus wird deutlich, dass die Anwendung von PreEffect-iFGS und Interpretation der Berechnungsergebnisse zu einem iterativen Prozess zwischen Systembewertung und Komponentenentwicklung führen, woraus eine Auslegung der integralen Systeme nach deren Feldeffektivität möglich wird. Auf der anderen Seite wird verdeutlicht wie das Verfahren zum Nachweis einer äquivalenten Feldeffektivität unterschiedlicher Systemstrategien zum Fußgängerschutz Anwendung findet. Durch die entwickelten Methoden für eine Integration von Erkenntnissen zu den Teilsystemkomponenten aus der realitätsnahen Erprobung wird in Aussicht gestellt, wie das Verfahren zur Definition von Testverfahren für integrale Systeme eingesetzt werden kann. Dieser Anwendungsfall zeigt, dass durch verschiedene Systemstrategien äquivalente Feldeffektivitäten erreichbar sind und folglich eine gleichwertige Leistungsfähigkeit im Realunfallgeschehen besitzen. Damit stellt die Methode PreEffect-iFGS ein Verfahren dar, durch welches eine vergleichende Bewertung von passiven Maßnahmen und Kollisionsvermeidungssystemen, wie in der zweiten europäischen Gesetzesphase zum Fußgängerschutz gefordert, durchgeführt werden kann.

Die fortschreitende Entwicklung der integralen Fahrzeugsicherheit zeigt sich auch im Bereich der Insassenschutzsysteme. Deshalb werden künftig sowohl die Gesetzgebung als auch Verbraucherschutzorganisationen vor der Herausforderung stehen, Maßnahmen, wie autonome Bremsengriffe zur Reduktion der Unfallschwere in Kombination mit adaptiven Rückhaltesystemen, in den Zulassungs- und Testverfahren berücksichtigen zu müssen. Für eine Berechnung der Feldeffektivität derartiger Systeme kann PreEffect-iFGS als Basis dienen, da das generelle Bewertungsvorgehen dem dargelegten Verfahren zum integralen Fußgängerschutz entspricht. Auch für die Berechnung der Verletzungsschwerereduktion von Fahrzeuginsassen ist zunächst zu analysieren, wie sich die Unfallsituationen durch den Systemeingriff aktiver Teilsystemkomponenten verändern, gefolgt von der Wirkungsweise innovativer passiver Technologien. Daraus wird deutlich, dass durch eine Adaption einzelner Methodenbausteine von PreEffect-iFGS, wie der Simulationsdatenbasis oder der Modellbildung passiver Schutzmaßnahmen, das Verfahren auch zukünftig für weitere integrale Sicherheitsfunktionen eingesetzt werden kann.

7 Anhang

7.1 Übersicht der sensoräquivalenten Unfalltypen

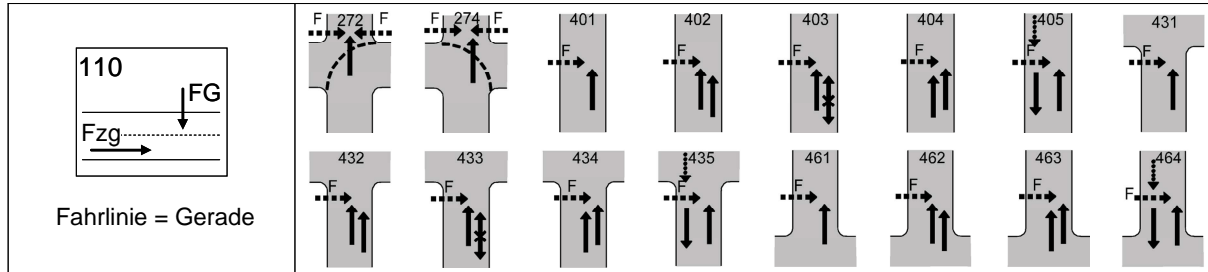


Abbildung 7-1: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 110

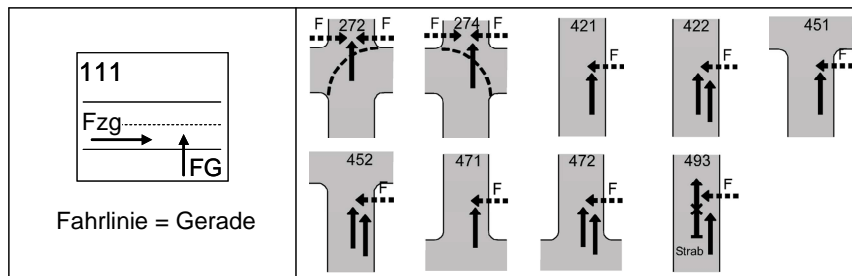


Abbildung 7-2: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 111

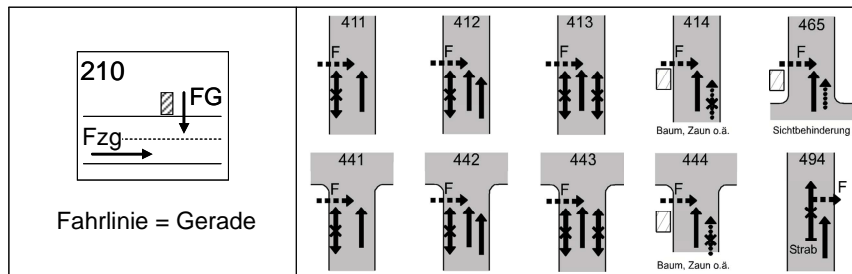


Abbildung 7-3: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 210

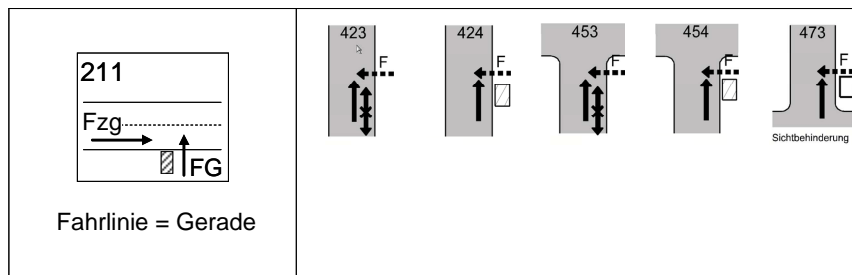


Abbildung 7-4: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 211

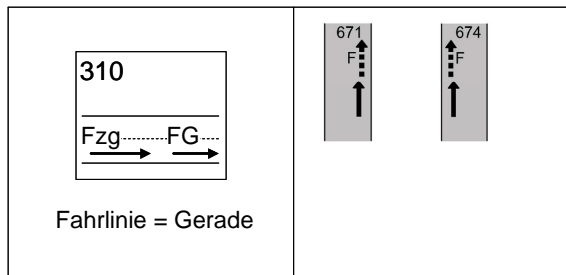


Abbildung 7-5: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 310

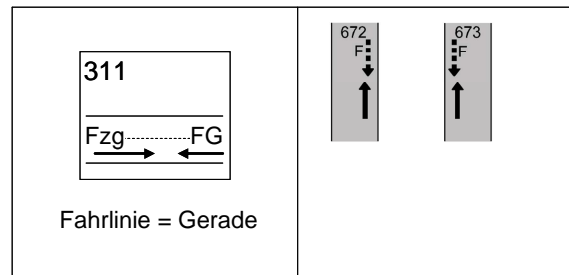


Abbildung 7-6: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 311

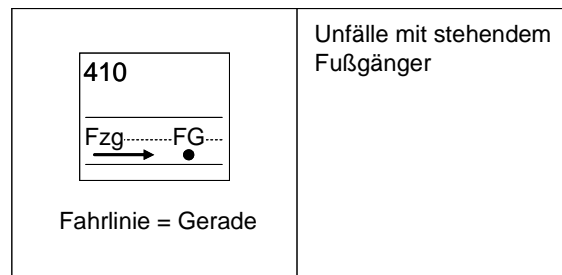


Abbildung 7-7: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps 410

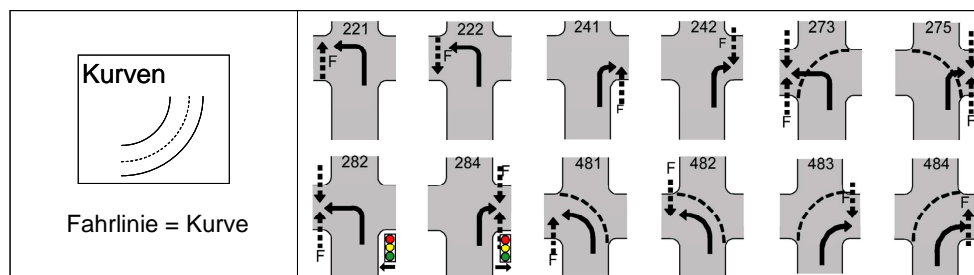


Abbildung 7-8: Unfalltypen des sensoräquivalenten Unfalltyps Kurven

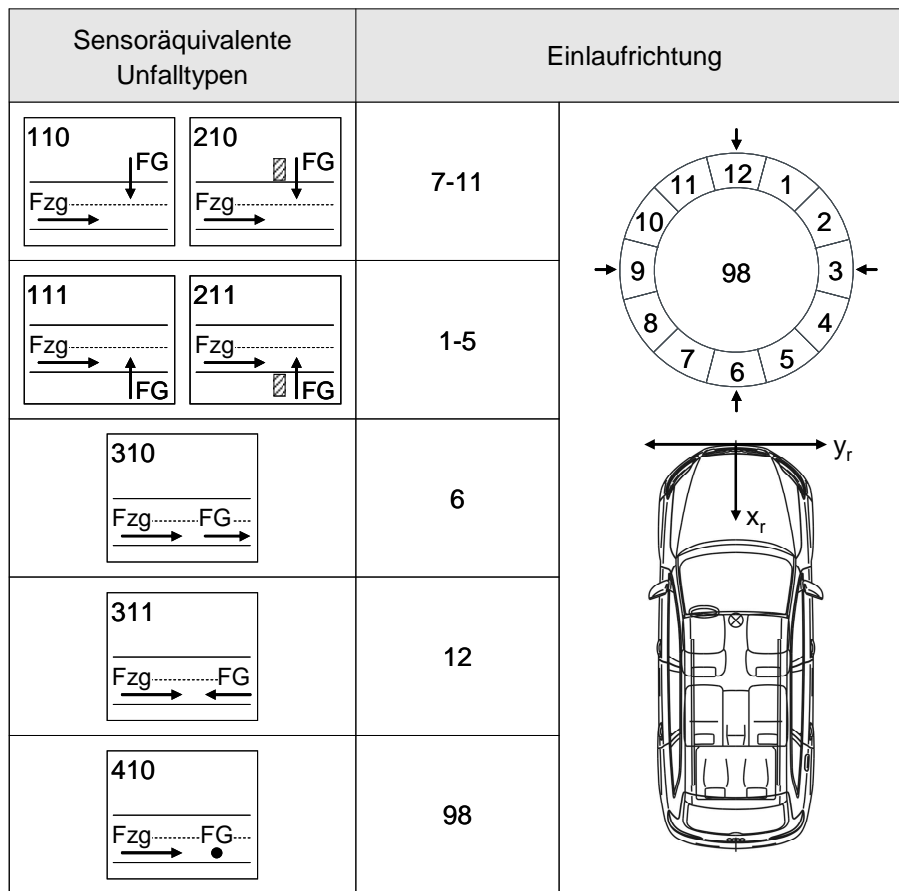


Abbildung 7-9: Ausprägungen der Fußgängereinlaufrichtung in sensoräquivalenten Unfalltypen

| Sensoräquivalenter Unfalltyp | Anteil | Sensoräquivalenter Unfalltyp | Anteil |
|------------------------------|--------|------------------------------|--------|
| 110.07 | 0,4% | 210.09 | 10,3% |
| 110.08 | 1,3% | 210.10 | 1,4% |
| 110.09 | 17,4% | 210.11 | 0,6% |
| 110.10 | 2,1% | 211.01 | 0,2% |
| 110.11 | 1,0% | 211.02 | 2,5% |
| 111.01 | 0,1% | 211.03 | 16,2% |
| 111.02 | 3,6% | 211.04 | 0,5% |
| 111.03 | 26,8% | 310.06 | 1,1% |
| 111.04 | 1,3% | 311.12 | 0,8% |
| 111.05 | 0,2% | 410.98 | 1,2% |
| 210.07 | 0,1% | Kurven | 10,9% |

Abbildung 7-10: Anteile sensoräquivalenter Unfalltypen im Analysedatensatz

7.2 Parametrisierung sensoräquivalenter Unfalltypen in ungebremsten Kollisionssituationen

$$v_{0,\text{fzg}} = v_k \quad \text{Gl. 7-1}$$

mit $v_{0,\text{fzg}}$ = Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug
 v_k = Kollisionsgeschwindigkeit Fahrzeug
aus der In - Depth - Datenbank

$$s_{0,\text{fzg}} = v_{0,\text{fzg}} \cdot t_{\text{konst}} \quad \text{Gl. 7-2}$$

mit $s_{0,\text{fzg}}$ = Startposition Fahrzeug
 $v_{0,\text{fzg}}$ = Ausgangsgeschwindigkeit Fahrzeug
 t_{konst} = Konstantfahrzeit

$$s_{0,\text{fg}} = v_{0,\text{fg}} \cdot t_{\text{konst}} \quad \text{Gl. 7-3}$$

mit $s_{0,\text{fg}}$ = Startposition Fußgänger
 $v_{0,\text{fg}}$ = Gehgeschwindigkeit Fußgänger
aus der In - Depth - Datenbank
 t_{konst} = Konstantfahrzeit

7.3 Das Verfahren der binär-logistischen Regressionsanalyse

Für eine Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Verletzungsrisiko und entsprechenden Einflussgrößen wird das Verfahren der binär-logistischen Regressionsanalyse eingesetzt. Daher erfolgt im nachfolgenden Kapitel eine kurze Einführung zu den mathematischen Grundlagen und Kennwerten zur Quantifizierung der Modellgüte.

7.3.1 Mathematische Grundlagen

Die binär-logistische Regressionsanalyse ist ein Verfahren zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen in Abhängigkeit von einer oder mehreren Einflussgrößen. Die empirischen Beobachtungen werden als abhängige Variablen bezeichnet und für eine Verarbeitung in der binär-logistischen Regressionsanalyse als Komplementärereignisse mit der Kategorie 1 (trifft zu) und Kategorie 0 (trifft nicht zu) formuliert. Die Einflussgrößen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit definieren sich als unabhängige Variablen, wobei diese sowohl kategoriales als auch metrisches Skalenniveau aufweisen können. Wird zur Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer abhängigen Variable nur eine unabhängige Variable betrachtet, erfolgt eine Bezeichnung des Verfahrens als einfache und bei mehreren unabhängigen Einflussparametern als multiple binär-logistische Regressionsanalyse. Das Ziel beider Ausprägungen besteht darin, über einen Regressionsansatz die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, mit welcher das Ereignis der Kategorie 1 in Abhängigkeit der unabhängigen Variablen eintritt. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten p der abhängigen Variablen stehen dabei im Zusammenhang nach Gl. 7-4 [BACKHAUS 2008, S. 244f.].

$$p(y = 1) + p(y = 0) = 1 \qquad \text{Gl. 7-4}$$

mit p = Eintrittswahrscheinlichkeit
 y = Ereignis der abhängigen Variable

Da es sich bei der abhängigen Variable um eine dichotome Verteilung handelt, ist eine lineare Einfachregression zur Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten durch die unabhängigen Variablen nicht geeignet. Zum einen resultieren daraus unplausible Werte für die Eintrittswahrscheinlichkeiten mit Ausprägungen kleiner als Null oder größer als Eins und zum anderen werden durch die dichotome Verteilung statistische Voraussetzungen zur Anwendung des linearen Verfahrens nicht erfüllt [BACKHAUS 2008, S. 247f.]. Die logistische Regressionsanalyse berechnet daher anstelle von konkreten Ausprägungen der Beobachtungen deren Eintrittswahrscheinlichkeit. Dabei erfolgt die Annahme, dass eine nicht

empirisch beobachtbare latente Variable z_k existiert, welche die dichotomen Kategorien der abhängigen Variable y_k unter Berücksichtigung von Ausprägungen der unabhängigen Variablen x_j erzeugt (Gl. 7-5).

$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{falls } z_k > 0 \\ 0 & \text{falls } z_k \leq 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 7-5}$$

mit y_k = Ereignis der abhängigen Variable für Beobachtungsfall k
 z_k = Aggregierte Einflussstärke der unabhängigen Variablen x_j

Diese Größe, auch als Logit bezeichnet, wird als aggregierte Einflussstärke der unabhängigen Variablen x_j interpretiert, wobei die Annahme erfolgt, dass die verschiedenen Einflussgrößen durch eine Linearkombination in Verbindung stehen. Für einen Beobachtungsfall ist dieser Zusammenhang in Gl. 7-6 dargestellt.

$$z_k = \beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot x_{jk} \quad \text{Gl. 7-6}$$

mit z_k = Aggregierte Einflussstärke der unabhängigen Variablen x_j
 β_0 = Konstante
 β_j = Regressionskoeffizient
 x_{jk} = Unabhängige Variable für den Beobachtungsfall k

$$p_k(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-z_k}} \quad \text{Gl. 7-7}$$

mit p_k = Eintrittswahrscheinlichkeit für den Beobachtungsfall k
 y = Ereignis der abhängigen Variable
 z_k = Aggregierte Einflussstärke der unabhängigen Variablen x_j

Die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses $y=1$ nach Maßgabe der aggregierten Einflussstärke z_k erfolgt über die logistische Funktion. Dabei spiegeln der Parameter β_0 und die Regressionskoeffizienten β_j , häufig auch als Logit-Koeffizienten bezeichnet, die Einflussstärke der unabhängigen Variablen x_j auf die Eintrittswahrscheinlichkeit wider. Die logistische Funktion stellt folglich eine Wahrscheinlichkeitsbeziehung zwischen dem Ereignis $y=1$ und den unabhängigen Variablen x_j her. Deshalb wird

diese auch als Linking-Function bezeichnet. Die logistische Regressionsgleichung zeigt Gl. 7-7. Die generierte Wahrscheinlichkeitsverteilung aus der logistischen Funktion für das Ereignis $y=1$ weist einen sigmoidalen Verlauf auf und besitzt die Eigenschaften, dass dieser für beliebig große oder kleine Werte des Prädiktors z innerhalb des Intervalls $[0,1]$ liegt und ein symmetrisches Verhalten um den Wendepunkt $p(y=1)=0,5$ besitzt. Die logistische Regressionsfunktion unterstellt folglich einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen den Eintrittswahrscheinlichkeiten der binären abhängigen Variablen und unabhängigen Variablen als Modellprämisse [BACKHAUS 2008, S. 249ff.]. Das Zustandekommen der aggregierten Einflussstärke z in Exponenten der Linking-Function wird als linear angenommen.

Die Schätzung des Parameters β_0 und der Regressionskoeffizienten β_j erfolgt unter Verwendung der Maximum Likelihood-Methode. Das Ziel dieses Verfahrens besteht darin, die eben genannten Parameter derart zu bestimmen, dass die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Eintretens der Ereignisse $y=1$ bzw. $y=0$ maximiert wird. Durch die Anwendung des Wahrscheinlichkeitssatzes erfolgt die Formulierung der Likelihood-Funktion L nach Gl. 7-8 [BACKHAUS 2008, S. 253], für welche Parameterkombinationen von β_0 und β_j identifiziert werden, die L maximieren. In der Regel erfolgt dies nach dem Newton-Raphson-Algorithmus [HOSMER 2000, S. 192f.].

$$L = \prod_{k=1}^K \left(\frac{1}{1 + e^{-z_k}} \right)^{y_k} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-z_k}} \right)^{1-y_k} \quad \text{Gl. 7-8}$$

mit L = Likelihood – Funktion

y_k = Ereignis der abhängigen Variable für Beobachtungsfall k

z_k = Aggregierte Einflussstärke der unabhängigen Variablen x_j

Durch eine Logarithmierung von Gl. 7-8 resultiert die LogLikelihood-Funktion LL nach Gl. 7-9, auf welche im Rahmen einer Quantifizierung der Modellgüte genauer eingegangen wird (Kapitel 7.3.2). Bei einer Interpretation der Regressionskoeffizienten ist zu beachten, dass der Zusammenhang zwischen Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Ereignis $y=1$ nicht linear ist, so dass eine Erhöhung der unabhängigen Variable x_j um eine Einheit nicht zu einer Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit um den Faktor des entsprechenden Regressionskoeffizienten führt. Ein linearer Zusammenhang der unabhängigen Variablen besteht in der aggregierten Einflussstärke z . Deshalb wirken sich äquivalente Veränderungen in den Ausprägungen einer unabhängigen Variable x_j in verschiedenen Bereichen der logistischen Funktion unterschiedlich auf die Eintrittswahrscheinlichkeit $p(y=1)$ aus. Allgemein gilt, dass negative Regressionskoeffizienten für steigende Ausprägungen von x_j zu einer Verringerung und positive zu einer Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit führen.

$$LL = \sum_{k=1}^K \left[y_k \cdot \ln \left(\frac{1}{1 + e^{-z_k}} \right) \right] + \left[(1 - y_k) \cdot \ln \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-z_k}} \right) \right] \quad \text{Gl. 7-9}$$

mit LL = LogLikelihood – Funktion

y_k = Ereignis der abhängigen Variable für Beobachtungsfall k

z_k = Aggregierte Einflussstärke der unabhängigen Variablen x_j

Für eine detaillierte Interpretation der Regressionskoeffizienten erfolgt der Verweis auf [BACKHAUS 2008, S.256ff.] und für weiterführende Literatur zur logistischen Regressionsanalyse auf [MENARD 2008], [HOSMER 2000] und [HARRELL 2005, S.215ff.].

7.3.2 Qualitätsmaße zur Analyse der Güte des Regressionsmodells

Für eine Quantifizierung der Approximationsgüte des binär-logistischen Regressionsmodells werden die in [BACKHAUS 2008, S.261ff.] vorgestellten Kennwerte herangezogen. Das erste Qualitätskriterium stellt der Likelihood-Ratio-Test (LR-Test) dar. Dieser vergleicht den maximierten LL-Wert des vollständigen Modells (LL_v) aus Gl. 7-9 mit dem Nullmodell (LL_0), wenn nur die Modellkonstante β_0 zur Maximierung der LogLikelihood-Funktion Berücksichtigung erfährt. Eine hohe absolute Differenz zwischen Nullmodell und vollständigem Modell weist auf eine hohe Erklärungskraft der unabhängigen Variablen hin. Diese ist Chi-Quadrat verteilt, so dass auf dieser Basis eine Beurteilung der Signifikanz des Modells durchgeführt wird. Ein großer Chi-Quadrat-Wert mit einem hohen Signifikanzniveau ($\alpha < 0,05$) korrespondiert diesbezüglich mit einer hohen Approximationsgüte [BACKHAUS 2008, S.270].

Weitere Kenngrößen stellen die Pseudo- R^2 -Statistiken Cox&Snell- R^2 (Gl. 7-10) und Nagelkerke- R^2 (Gl. 7-11) dar. Diese liefern eine Aussage zur Erklärungskraft des Regressionsmodells. Grundlagen zur Berechnung bilden der Likelihood (Gl. 7-8) des Nullmodells (L_0) bzw. vollständigen Modells (L_v) und der Stichprobenumfang. Nach [BACKHAUS 2008, S.270] weisen Werte ab 0,2 auf eine akzeptable Modellgüte hin.

$$\text{Cox \& Snell - } R^2 = 1 - \left[\frac{L_0}{L_v} \right]^{\frac{2}{K}} \quad \text{Gl. 7-10}$$

mit L_0 = Likelihood des Nullmodells

L_v = Likelihood des vollständigen Modells

K = Stichprobenumfang

$$\text{Nagelkerke } -R^2 = \frac{\text{Cox \& Snell } -R^2}{R_{\max}^2} \quad \text{Gl. 7-11}$$

$$\text{mit } R_{\max}^2 = 1 - (L_0)^{\frac{2}{K}}$$

$L_0 = \text{Likelihood des Nullmodells}$

Eine weitere Quantifizierung der Modellanpassung erfolgt durch die Beurteilung des Klassifikationsergebnisses. Für diese Analyse werden die empirisch beobachteten Gruppenzugehörigkeiten mit den durch die Regressionsgleichung erzeugten Wahrscheinlichkeiten verglichen. Als Trennwert erfolgt als Standard die Definition einer Eintrittswahrscheinlichkeit von $p(y=1)=0,5$, woraus die Zuordnungsvorschrift nach Gl. 7-12 resultiert.

$$y_k = \begin{cases} \text{Gruppe } y = 1 & \text{falls } p_k(y = 1) \geq 0,5 \\ \text{Gruppe } y = 0 & \text{falls } p_k(y = 1) < 0,5 \end{cases} \quad \text{Gl. 7-12}$$

mit $y_k = \text{Ereignis der abhängigen Variable für Beobachtungsfall } k$
 $p_k = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit für Beobachtungsfall } k$

Aus diesem Resultat wird der Anteil an korrekt klassifizierten Beobachtungen, bezogen auf den gesamten Stichprobenumfang, ermittelt. Eine richtige Klassifikation bedeutet beispielsweise, dass für den Fußgänger eine schwere Verletzung beobachtet wird und das logistische Modell für diesen Fall eine Eintrittswahrscheinlichkeit größer oder gleich 0,5 vorhersagt. Für das berechnete Ergebnis erfolgt ein Vergleich mit der proportionalen Zufallswahrscheinlichkeit, welche eine Aussage über die Trefferquote bei einer zufälligen Klassifikation der Beobachtungen liefert. Das Regressionsmodell weist eine hohe Güte auf, wenn der Wert des Klassifikationsergebnisses die proportionale Zufallswahrscheinlichkeit übersteigt, da nur in diesem Fall eine bessere Trefferquote als nach dem Zufallsprinzip zu erwarten ist [BACKHAUS 2008, S.267].

Weitere Prüfgrößen stellen der Press's Q- und Hosmer-Lemeshow-Test dar. Der Kennwert des Press's Q-Test (Gl. 7-13) folgt einer Chi-Quadrat-Verteilung und findet Anwendung zur Kreuzvalidierung der Klassifikationsergebnisse. Überschreitet die Kenngröße den tabellierten Chi-Quadrat-Wert von 3,84 bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$, sind die Klassifikationsergebnisse signifikant von einer zufällig Klassifikation verschieden.

$$\text{Press's } Q = \frac{[K - (K \cdot G \cdot a)]^2}{K \cdot (G - 1)}$$

Gl. 7-13

mit K = Stichprobenumfang
 G = Anzahl der Gruppen
 a = Klassifikationsergebnis

Der Hosmer-Lemeshow-Test überprüft die Nullhypothese, dass die Differenz zwischen den vorhergesagten und beobachteten Ereignissen gleich Null ist. Die Beobachtungsfälle werden in Gruppen aufgeteilt und anschließend wird mit einem Chi-Quadrat-Test überprüft, in welchem Maße die beobachteten und erwarteten Häufigkeiten für das Ereignis $y=1$ in den Gruppen abweichen. Unter Berücksichtigung der Chi-Quadrat-Prüfgröße erfolgt eine Beurteilung, ob die Nullhypothese abgelehnt werden kann. Ergibt die Prüfgröße ein geringes Signifikanzniveau, wird die Nullhypothese nicht abgelehnt und es ist davon auszugehen, dass die Abweichungen zwischen den empirisch beobachteten und errechneten Häufigkeiten nicht häufiger als dem Zufall entsprechend auftreten.

Für eine Überprüfung, ob zu viele unabhängige Variablen im Modell berücksichtigt werden, was zu einem Modell-Overfitting führt, erfolgt eine Durchführung des Likelihood-Quotienten-Tests. Dieser stellt in Anlehnung an den Likelihood-Ratio-Test das vollständige Modell reduzierten Modellen gegenüber. Diese reduzierten Modelle resultieren daraus, dass jeweils ein Regressionskoeffizient zu Null gesetzt und die Differenz der -2LogLikelihoods ($-2LL$) zwischen vollständigem und reduziertem Modell gebildet wird. Die zugrundeliegende Nullhypothese besagt, dass der zu Null gesetzte Regressionskoeffizient keinen Effekt auf die Modellzusammenhänge besitzt. Eine Signifikanzprüfung der Testgröße erfolgt auch hier über eine Chi-Quadrat-Verteilung. Ein hohes Signifikanzniveau ($\alpha < 0,05$) führt zu einer Ablehnung der Nullhypothese und besagt, dass die aus dem Modell entfernte Variable einen signifikanten Einfluss auf die Modellzusammenhänge besitzt [BACKHAUS 2008, S.273].

8 Literaturverzeichnis

- AAAM 2001** Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM): ***The Abbreviated Injury Scale 1990 Revision - Update 98***. Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM), Barrington, 2001
- AAAM 2005** Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM): ***Abbreviated Injury Scale 2005***. Association for the Advancement of Automotive Medicine, Barrington, 2005
- ALT 2002** Alt, W.: ***Nichtlineare Optimierung – Eine Einführung in Theorie, Verfahren und Anwendung***. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 2002
- APPEL 2002** Appel, H.; Krabbel, G.; Vetter, D.: ***Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion***. 2. Auflage, Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim, 2002, S. 37
- AUDI 2010** Audi AG: ***Fußgängerschutzanlage im Testbetrieb***. Ingolstadt, 2010
- BACKHAUS 2008** Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: ***Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung***. 12. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2008
- BAMBERG 1994** Bamberg, R.; Zellmer, H.: ***Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz - Vermeidbare Personenschäden bei Einführung des Testvorschlages der EEVC-WG 10 zur Prüfung der Pkw-Frontfläche***. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik Band F5, Wirtschaftsverl. NW, Bremerhaven, 1994
- BOGENRIEDER 2009** Bogenrieder, R.; Fehring, M.; Bachmann, R.: ***PRE-SAFE In Rear-End Collision Situations***. Tagungsunterlagen 21. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Paper Number: 09-0129, Stuttgart, 2009
- BOSCH 2003** Robert Bosch GmbH: ***Kraftfahrtechnisches Taschenbuch***. 25. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2003

- BOTSCH 2010** Botsch, M.; Lauer, C.: **Complexity Reduction Using the Random Forest Classifier in a Collision Detection Algorithm**. Tagungsunterlagen 2010 Intelligent Vehicles Symposium, San Diego, 2010
- BREUER 2006** Breuer, B.; Bill, K. (Hrsg.): **Bremsenhandbuch**. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2006, S. 351-353
- BURG 2007** Burg, H.; Moser, A.: **Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion**. Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2007
- BUSCH 2005** Busch, S.: **Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme**. Dissertation TU Dresden, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Band 588, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005
- CRAN 2010** The Comprehensive R Archive Network (CRAN): **Locfit – Local Regression, Likelihood and Density Estimation**. Version: 1.5-6, URL: <http://cran.r-project.org/web/packages/locfit/index.html>, Stand 19.03.2010
- DESTATIS 2009A** Statistisches Bundesamt (Destatis): **Verkehr - Verkehrsunfälle**. Fachserie 8, Reihe 7, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2009, URL https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige_csp&ID=1024215, Stand 19.02.2010
- DESTATIS 2009B** Statistisches Bundesamt (Destatis): **Verkehrsunfälle – Zeitreihen 2008**. URL: https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige_csp&ID=1024217, Stand 19.02.2010
- DESTATIS 2009c** Statistisches Bundesamt (Destatis): **Bevölkerung und Erwerbstätigkeit – Bevölkerungsfortschreibung**. Fachserie 1, Reihe 1.3, Wiesbaden, 2007, URL https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,vollanzeige_csp&ID=1025319, Stand 19.02.2010
- DISTNER 2009** Distner, M.; Bengtsson, M.; Broberg, T.; Jakobsson, L.: **City Safety – A System Addressing Rear-End Collision At Low Speeds**. Tagungsunterlagen 21. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Paper Number: 09-0371, Stuttgart, 2009

- DSD 2009** Dr. Steffan Datentechnik Ges.m.b.H (DSD): **PC-Crash – Ein Computerprogramm zur Simulation von Verkehrsunfällen**. Version 8.2, Linz, 2009, URL http://80.123.144.74/dsd/index.php?option=com_content&view=article&id=76%3Apcrcrash&catid=14%3Asoftware&Itemid=26&lang=de, Stand 19.02.2010
- DUBA 2008** Duba, G.; Bock, T.: **Adaptive Cruise Control**. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Der neue Audi Q5, Ausgabe 2008-02, S. 59
- EURONCAP 2009** European New Car Assessment Programme (EuroNCAP): **Pedestrian Testing Protocol**. Version 5.0, October 2009, URL <http://www.euroncap.com/files/Euro-NCAP-Pedestrian-Protocol-Version-5.0---0-b54ab405-4cea-4212-a168-23b6e639d90e.pdf>, Stand 13.02.2010
- EUROPÄISCHE KOMMISSION 2001** Europäische Kommission: **Weißbuch – Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft**. Amt für Amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, 2001, S 74ff.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION 2009** Europäische Kommission – Informationsgesellschaft: **eCall – Leben retten durch Kommunikationstechnologien im Fahrzeug**. Factsheet 49, August, 2009, URL: http://ec.europa.eu/information_society/doc/factsheets/049eCall_august09_de.pdf, Stand 11.04.2010
- EUROPÄISCHE UNION 2009** Amtsblatt der Europäischen Union: **Verordnung (EG) Nr. 78/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Januar 2009**. URL: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:035:0001:0031:DE:PDF>, Stand 10.04.2010
- FAHRMEIR 2007A** Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: **Statistik – Der Weg zur Datenanalyse**. 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2007
- FAHRMEIR 2007B** Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: **Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen**. Springer-Verlag, Berlin, 2007
- GEIGER 2002** Geiger, C.; Kanzow, Ch.: **Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben**. Springer-Verlag, Berlin, 2002
- GIDAS 2008** German In-Depth-Accident-Study (GIDAS): **Codebook GIDAS 2008**.

- GIDAS 2009** German In-Depth-Accident-Study (GIDAS): **Unfallerehebungen vor Ort – Dresden und Hannover**. URL: <http://www.gidas.org/files/GIDAS.pdf>,
Stand 07.02.2010
- GOLLEWSKI 2008** Gollewski, T.: **Integrale Sicherheit – Herausforderungen, aktuelle Funktions- und Auslegungskonzepte aus Sicht eines OEMs**. Tagungsunterlagen Integrated Safety 2008, Hanau/Steinheim, 2008, S. 7
- HANNAWALD 2003** Hannawald, L.; Kauer, F.: **Equal Effectiveness Study on Pedestrian Protection**. Dresden, 2003, URL <http://www.vufo.de/index.php?plugin=dokumente&action=details&id=26>, Stand 12.02.2010
- HANNAWALD 2008** Hannawald, L.: **Multivariate Bewertung zukünftiger Fahrzeugsicherheit**. Dissertation TU Dresden, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Band 682, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008
- HARA 1998** Hara, M.; Ohata, M.; Yamamoto, A.; Yoshida, H.: **Development of the Brake Assist System**. Tagungsunterlagen 16. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Paper Number: 98-S2-P-17, Windsor, 1998, S. 497-501
- HARRELL 2005** Harrell, F.: **Regression modeling strategies – With applications to linear models, logistic regression, and survival analysis**. Springer-Verlag, New York, 2005
- HEIBING 2007** Heißing, B.; Ersoy, M.: **Fahrwerkhandbuch - Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven**. Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2007, S.178
- HEIBING 2009** Heißing, B.: **Straßenfahrzeuge: Entwurf und Simulation – Automobilentwicklungsprozess**. Vorlesungsunterlagen Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Wintersemester 2009/2010
- HOSMER 2000** Hosmer, D.; Lemeshow, S.: **Applied logistic regression**. 2. Auflage, Wiley-Verlag, New York, 2000
- IRTAD 2009** International Road Traffic and Accident Database (IRTAD): **About IRTAD**. URL: <http://internationaltransportforum.org/irtad/about.html>,
Stand 02.09.2009

- JANSSON 2002** Jansson, J.; Ekmark, J.; Gustafsson, F.: **Decision Making For Collision Avoidance Systems**. SAE Technical Paper 2002-01-0403, 2002
- KIESEWETTER 1997** Kiesewetter, W.; Klinkner, W.; Reichelt, W.; Steiner, M.: **Der neue Brake Assist von Mercedes-Benz**. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Ausgabe 6, 1997, S. 330-339
- KRAMER 2009** Kramer, F.: **Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen**. 3. überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner-Verlag, Wiesbaden 2009
- KÜHN 2007** Kühn, M.; Fröming, R.; Schindler, V.: **Fußgängerschutz – Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- KÜHN 2009** Kühn, M.; Strzeletz, R.; Kampa, A.: **Bewertung von Untersuchungsmethoden zum Fußgänger-Fahrzeug-Unfall**. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (VKU), Ausgabe 2009-06, S. 194-203
- LIERS 2009** Liers, H.: **Benefit estimation of the EuroNCAP pedestrian rating concerning real world pedestrian safety**. Tagungsunterlagen 21. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Paper Number: 09-0387, Stuttgart, 2009
- LOADER 1999** Loader, C.: **Local regression and likelihood**. Springer-Verlag, New York, 1999
- LÜCKE 1999** Lücke, H.; Wagner, J.; Wiss, H.: **Hydraulischer Bremsassistent**. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Ausgabe: 1999-06
- MATLAB 2009** The Mathworks Inc.: **Optimization Toolbox – Fmincon Active Set Algorithm**. Matlab Produkthilfe Optimization Toolbox, Matlab, Version R2009a, URL: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/optim/ug/fmincon.html>, Stand 25.11.2009
- MENARD 2008** Menard, S.: **Applied logistic regression analysis**. 2. Auflage, Sage-Verlag, Thousand Oaks, 2008
- PFEIFFER 2006** Pfeiffer, M.; Schmidt, J.: **Statistical and methodological foundations of the GIDAS accident survey system**. Tagungsunterlagen 2. International Conference on ESAR, Hannover, 2006

- REßLE 2010** Reßle, A.; Schramm, S.; Kölzow, T.: **Generierung von Verletzungsrisikofunktionen für Fußgängerkollisionen**. Tagungsunterlagen Crash.Tech 2010, Leipzig, 2010
- ROTH 2008A** Roth, F.; Schramm, S.; Riedel, H.; Stoll, J.: **Integraler Fußgängerschutz – Bewertungsmethoden**. Tagungsunterlagen 3. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch-Gladbach, 2008
- ROTH 2008B** Roth, F.; Stoll, J.; Zander, A.; Schramm, S.; von Neumann-Cosel, K.: **Methodik zur Funktionsentwicklung des vorausschauenden Fußgängerschutzes**. 24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Wolfsburg, 2008
- ROTH 2009** Roth, F.; Stoll, J.; Zander, A.; Maier, K.; Dubitzky, R.; Schramm, S.: **Integraler Fußgängerschutz – Funktionsentwicklung**. Tagungsunterlagen 4. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch-Gladbach, 2009
- SCHRAMM 2009A** Schramm, S.; Roth, F.: **Method to assess the effectiveness of active pedestrian protection safety systems**. Tagungsunterlagen 21. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Paper Number: 09-0398, Stuttgart, 2009
- SCHRAMM 2009B** Schramm, S.; Roth, F.; Kuhn, A.; Sigl, S.; Palau, A.: **Verfahren zur prognostischen Bewertung wenigstens eines vorausschauenden Sicherheitssystems eines Kraftfahrzeugs**. Offenlegungsschrift, Anmeldenummer 102008027509, Veröffentlichungsdatum 31.12.2009
- SAFETYNET 2008** SafetyNet - Building the European Road Safety Observatory: **Annual Statistical Report – Based on the data from CARE / EC**. Workpackage 1 – Task 3 Deliverable No: D 1.16, Date of issue: 31/02/2008, S.9, URL:http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/care/doc/safetynet/2007/sn-1-3-asr-2007_final.pdf, Stand 10.04.2010
- SPSS 2009** SPSS Inc., an IBM Company (SPSS): **PASW Statistics 17.0**. URL: <http://www.spss.com/statistics>, Stand 23.02.2010
- TOUTENBURG 2009** Toutenburg, H.; Heumann, C.; Schomaker, M.; Wißmann, M.: **Arbeitsbuch zur deskriptiven und induktiven Statistik**. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009

- UDV 2010** Unfallforschung der Versicherer (UDV): **Unfalltypenkatalog**. Version 1.0.0, URL <http://www.udv.de/publikationen/software/>, Stand 23.02.2010
- UNSELT 2004** Unselt, T.; Breuer, J.; Eckstein, L.: **Fußgängerschutz durch Bremsassistenten**, Tagungsunterlagen Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching bei München, 2004
- WEIßE 2003** Weiße, J.: **Beitrag zur Entwicklung eines optimierten Bremsassistenten**. Dissertation TU Darmstadt, Ergonomia-Verlag, Stuttgart, 2003, S. 48ff.
- WHO 2009** World Health Organization (WHO): **Causes Of Death**. URL <http://www.who.int/research/en/>, Stand 19.11.2009
- WIDMANN 2008** Widmann, U.; Gollewski, T.: **Herausforderungen Integrale Sicherheit**. Tagungsunterlagen Karosseriebautage, Hamburg, 2008
- WOODS 2006** Wodds, S.: **Generalized additive models - An introduction with R**. Chapman & Hall-Verlag, Boca Raton, 2006, S.121ff.
- WYMAN 2007** Oliver Wyman Consulting GmbH: **Car Innovation 2015**. URL: http://www.car-innovation.de/pdf/studie_car_innovation_2015.pdf, Stand 10.04.2010
- YANG 2005** Yang, J.; Yao, J.; Otte, D.: **Correlation of different impact conditions to the injury severity of pedestrians in real world accidents**. Tagungsunterlagen 19. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Paper Number: 05-0352, Washington, 2005
- ZOBEL 2007** Zobel, R.; Strutz, T.; Scheef, J.: **What accident analysis tells about safety evaluations of passenger vehicles**. Tagungsunterlagen 20. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Paper Number: 07-0330, Lyon, 2007
- ZOMOTOR 1991** Zomotor, A.; Reimpell, J. (Hrsg.): **Fahrwerktechnik: Fahrverhalten**. 2. aktualisierte Auflage, Vogel-Verlag, Würzburg, 1991, S.52