

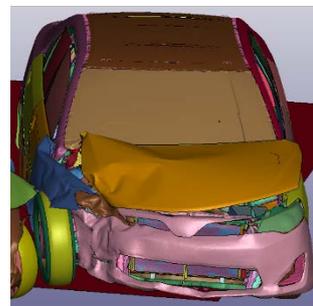
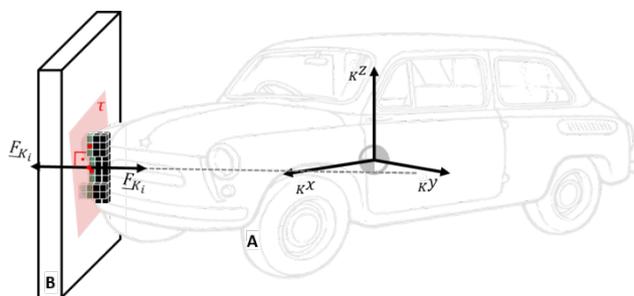
# 3-DIMENSIONALES EES-MODELL AUF BASIS VON UNFALL- UND CRASH-TEST-DATEN

## Phase 3

Pascal Breitlauch, M. Eng.

Gefördert von der ADAC Stiftung

Dresden, Dezember 2021



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Durchführung</b> .....	<b>5</b>
2.1	AP 3.1 Recherche bestehender Berechnungsmodelle .....	5
2.1.1	Klassische Stoßtheorie, Impulsverfahren .....	5
2.1.2	Kraftrechnung, Steifigkeitsbasiertes Ellipsoid-Stoßmodell .....	6
2.1.3	Kraftrechnung, Steifigkeitsbasiertes Mesh-Modell .....	8
2.1.4	Mehrkörpermodelle .....	9
2.1.5	Finite Elemente Methode .....	10
2.1.6	Methoden zur Abschätzung von Beschleunigungsverläufen bei Pkw-Kollisionen ..	12
2.1.7	Zwischenfazit .....	14
2.2	AP 3.3 Erarbeitung eines neuen Kollisionsberechnungsansatzes auf reinen Deformationsenergiemodell Daten .....	15
2.2.1	Zweidimensionale Bewegung eines Objektes .....	15
2.2.2	Entwicklung der zweidimensionalen Stoßberechnungsmethode für EES-Modelle ..	17
2.2.2.1	Gerader, zentrischer Zusammenstoß .....	19
2.2.2.2	Schräger, exzentrischer Zusammenstoß .....	21
2.2.2.3	Zwischenfazit .....	22
2.2.3	Dreidimensionale Bewegung eines Pkw .....	23
2.2.4	Übertragung der Stoßberechnungsmethode auf ein dreidimensionales EES-Modell	24
2.2.4.1	Schräger, exzentrischer Zusammenstoß .....	24
2.2.4.2	Zwischenfazit .....	27
2.2.5	Übertragung der entwickelten Methode auf den Stoß zweier Pkw-EES-Modelle ...	28
2.2.5.1	Auswahl der EES-Modelle .....	29
2.2.5.2	Identifikation der deformierten Voxel .....	30
2.2.5.3	Deformation umliegender Voxel .....	30
2.2.5.4	Zwischenfazit .....	32
2.3	AP 3.5 Programmtechnische Umsetzung eines Fzg-Fzg-Crash-Berechnungsmodells	33
2.3.1	Implementierung der Stoßberechnungsmethode .....	33
2.3.2	Berechnung einer EES über den gesamten Stoßvorgang .....	35
2.3.3	Zwischenfazit .....	36
2.4	AP 3.6 Validierung – Vergleich des Berechnungsansatzes mit realen Crashtests ..	37
2.5	AP 3.n Berechnung von Verletzungsrisikofunktionen zur Verletzungsschwereprognose	40
2.6	AP 3.2 Tool zur Nutzung in der PC-Crash-EES-Berechnung .....	41
2.7	AP 3.7 Beispielhafte Berechnung einer neuen Crashkonfiguration .....	41
2.7.1	Pkw-Pkw-Kollision, frontal .....	41
2.7.2	Pkw-Pkw-Kollision, seitlich .....	42
2.7.3	Pkw-Pkw-Kollision, Heck .....	43
2.7.4	Pkw-Pfahl-Kollision, frontal .....	44
2.7.5	Pkw-Pfahl-Kollision, seitlich .....	45
2.8	AP 3.4 Bewertung der Relevanz neu identifizierter kritischer Crashkonfigurationen	46
2.8.1	Situation A: Pkw-Pkw-frontal, 50% Offset bei einem Winkel von 30° zur Fahrzeuglängsachse	47
2.8.2	Situation B: Pkw-Pkw-seitlich, 40 cm hinter dem Schwerpunkt bei einem Winkel von 20° zur Fahrzeugquerachse .....	48
2.8.3	Situation C: Pkw-Pkw-seitlich, 90 cm hinter dem Schwerpunkt bei einem Winkel von -40° zur Fahrzeugquerachse .....	48
2.8.4	Situation D: Pkw-Pkw-frontal, 70% Offset bei einem Winkel von 20° zur Fahrzeuglängsachse	49
2.8.5	Situation E: Pkw-Pfahl-frontal, 70 cm neben der Fahrzeuglängsachse bei einem Winkel von -20° zur Fahrzeuglängsachse, Pfahldurchmesser 60 cm .....	50
2.8.6	Zwischenfazit .....	50

2.9	AP 3.8 Konzepte und Beispiele für eine vollständige Systembewertung bzw. eine Crashkompatibilitätserkennung.....	51
2.9.1	Systembewertung eines bestehenden Fahrerassistenzsystems (ADAS).....	51
2.9.2	Echtzeitanwendung zur Ableitung einer pre-crash action zur Verringerung der Verletzungsrisiken 52	
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>53</b>

Neben Tests zur Gewährleistung der Erfüllung gesetzlicher Richtlinien, beispielweise der ECE, haben in den letzten Jahrzehnten auch Tests von Verbraucherschutzorganisationen wie beispielsweise EuroNCAP («European New Car Assessment Programme») höchste Popularität gewonnen und erfreuen sich großer Beachtung in der Gesellschaft und in der Fahrzeugentwicklung.

Im EuroNCAP werden seit 1996 Crashtests mit neu erschienenen Fahrzeugen durchgeführt. Die Kriterien sind hierbei anspruchsvoller als bei ECE-Zulassungstests. Die Einführung des EuroNCAP hat zweifelsfrei zu einer sprunghaften Verbesserung der passiven Sicherheit in Pkw geführt. In den letzten Jahren gab es jedoch hin und wieder Kritik an den Testprozeduren des EuroNCAP bzw. der Hersteller. Die bestmögliche Erfüllung der Testprozeduren wurde zu einem der wesentlichen Entwicklungsziele der Hersteller. Dies führte zu enormen Anstrengungen in der Konstruktion und Auslegung der passiven Sicherheitsstrukturen in modernen Fahrzeugen, um genau die geordneten Testfälle - ungeachtet möglicher Variationen - zu erfüllen. Kompatibilitätscrashtests, in denen zwei sehr unterschiedliche Fahrzeuge gegeneinander antraten, zeigten bereits wesentlich höhere Verletzungsrisiken. Einen weiteren Schritt ging das IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) 2012, indem es den bis dato durch EuroNCAP festgelegten 40%-Offset beim Crash gegen eine deformierbare Barriere auf 25% herabsetzte. Der neu entstandene sogenannte „small overlap“-Test führte zu einem sprunghaften Anstieg der Verletzungswahrscheinlichkeit bei Fahrzeugen, die in der herkömmlichen Bewertung sehr gute Ergebnisse vorweisen konnten.

Es bedarf einer Möglichkeit zur wissenschaftlich fundierten Identifikation und Definition von Schwachstellen der passiven Sicherheit aktueller Pkw-Modelle mit dem Ziel, verschiedene unsichere Kollisionskonstellationen bei Crashtest-Programmen vorzuschlagen, um auch in den bislang nicht abgeprüften Zonen und Anprallkonstellationen wesentlich mehr Sicherheit zu erzeugen. Diese Identifikation kann auf einem sogenannten »Energy Equivalent Speed (EES)«-Modell basieren. Aus diesem Grund wird eine neue Berechnungsmethode entwickelt, um auf Basis eines EES-Modells Kollisionsberechnungen durchführen zu können. Fokus der Berechnungsmethode soll eindeutig auf der Rechenzeit liegen. Die Voraussetzungen für eine schnelle Kollisionsberechnung sind durch das vorliegende vorgefilterte EES-Modell gegeben. Nach dem erfolgten Test der Berechnungsmethode wird diese zunächst angewandt, um neuartige Kollisionssituationen an verschiedenen Fahrzeugen zu berechnen.

Mit Hilfe von Verletzungsrisikofunktionen, dem Einsatz des EES-Modells und den entwickelten Berechnungsmethoden ist es nun erstmals möglich, die Effektivitätsbewertung aktueller und zukünftiger Fahrerassistenz- oder automatisierter Systeme zu ermöglichen. Eine Handlungsanweisung mit entsprechendem Beispiel schließt das Forschungsprojekt ab. Es ist davon auszugehen, dass diese neue Möglichkeit Verbraucherschutzorganisationen einen großen Nutzen bringt.

### 2.1 AP 3.1 Recherche bestehender Berechnungsmodelle

Viele der nachfolgend erläuterten Methoden zur Stoßberechnung wurden entwickelt, als Computertechnik bereits verbreitet war. Davor wurden Kollisionen ausschließlich manuell, also grafisch oder rechnerisch, analysiert. Die generelle Berechnungsmethode vor der allgemeinen Verfügbarkeit von Computern basiert auf der klassischen Stoßtheorie und wird im Folgenden erläutert. (Burg, et al., 2009 und Brüderlin, 1941) Einige der Methoden werden anhand der Unfallrekonstruktionssoftware PC-Crash erläutert. Dies ist mit mehr als 6000 verkauften Lizenzen eines der aktuell führenden Programme zur Unfallrekonstruktion und wird als Referenz für den aktuellen Stand der Technik verwendet. (DSD Dr. Steffan Datentechnik)

#### 2.1.1 Klassische Stoßtheorie, Impulsverfahren

Diese Methode zur Stoßberechnung basiert auf der klassischen Stoßtheorie nach Galilei, Huygens und Newton. In diesem Abschnitt wird sie auf die Kollision von Fahrzeugen übertragen und es werden Schwachstellen aufgezeigt. Um die klassische Stoßtheorie auf einen Verkehrsunfall anzuwenden, müssen nach Burg, et al., 2009 folgende Vereinfachungen berücksichtigt werden:

- In der Berechnung werden nur die Stoßkräfte zwischen den stoßenden Fahrzeugen berücksichtigt. Reifenkräfte werden aufgrund der um ein Vielfaches größeren Stoßkräfte vernachlässigt.
- Die Deformationen der Fahrzeuge werden nicht berechnet. Während des Stoßes werden die Fahrzeuge als starre Körper vereinfacht.
- Die Fahrzeuge werden für den sehr kurzen Stoß zum Zeitpunkt der tiefsten Eindringung positioniert, wie in Abbildung 2-1 dargestellt. Es wird angenommen, dass die Stoßkräfte zu diesem Zeitpunkt maximal sind. Der Anwender muss Annahmen zur Lage von Stoßpunkt und Stoßebene treffen, wodurch er Einfluss auf das Ergebnis ausübt.

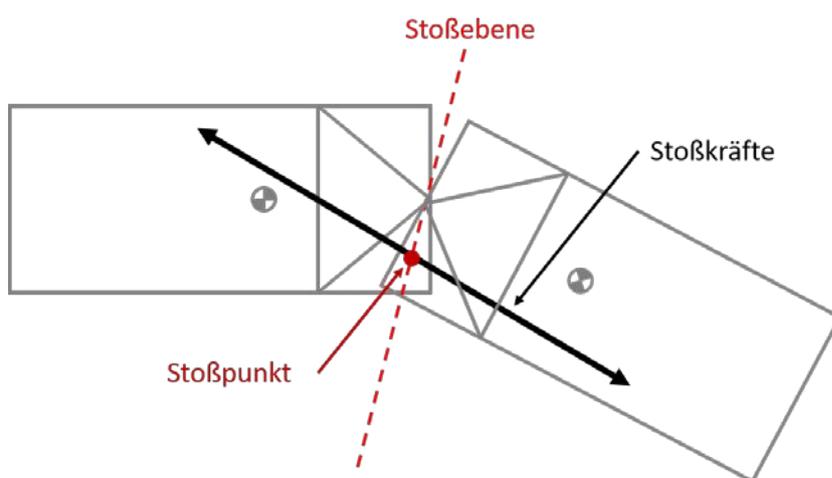


Abbildung 2-1: Positionierung zweier Fahrzeuge für das klassische Stoßmodell

### Vorteile:

Trotz der genannten Vereinfachungen wird dieses Verfahren sehr häufig genutzt, um mit niedrigem Zeitaufwand die Geschwindigkeiten von Fahrzeugen vor/nach der Kollision zu berechnen. Durch seine Einfachheit kann es manuell oder rechnergestützt verwendet werden. Dabei sind sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Ansätze verbreitet.

Die klassische Stoßtheorie findet in vielen Programmen zur Kollisionsberechnung von Verkehrsunfällen Anwendung. Nach Burg, et al., 2009 und McHenry, 2001 wurde ein solcher Algorithmus erstmals von dem in den USA entwickelten Programm CRASH verwendet. Des Weiteren wurde das Impulsverfahren unter anderem in den Programmen PC-Crash, AnalyzerPro, CARAT-3, VirtualCRASH, EDCRASH von Engineering Dynamics Corporation (EDC) und REC-TEC implementiert (vgl. DSD Dr. Steffan Datentechnik; AnalyzerPro KG; Fittanto, et al., 2002; Virtual CRASH LLC; EDC Engineering Dynamics Corporation und REC-TEC).

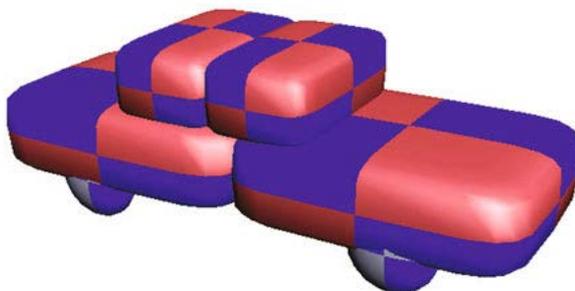
### Nachteile:

Die vorgestellten Vereinfachungen zeigen die Grenzen des Verfahrens auf. Kollisionen mit geringen Relativgeschwindigkeiten, bei denen die Gewicht- und Reifenkräfte gegenüber den Stoßkräften nicht vernachlässigbar sind, werden nur unzureichend abgebildet. Des Weiteren ist dieses Verfahren nicht in der Lage, die Deformationen von Fahrzeugen zu berechnen. Durch die Betrachtung als Stoß in sehr kurzer Zeit ist keine Aussage über den Verlauf von Zustandsgrößen wie Kraft und Beschleunigung während der Kollision möglich. Fußgängerunfälle können aufgrund der Nutzung starrer Körper ebenfalls nur unzureichend simuliert werden. Zudem setzt die Verwendung des auch Impulsverfahren genannten Vorgehens einen sicheren Umgang mit der klassischen Stoßtheorie voraus. Werden wichtige Annahmen wie der Stoßpunkt, die Stoßzahl und die Lage der Berührebene falsch getroffen, so wirkt sich dies negativ auf das Ergebnis aus.

## **2.1.2 Kraftrechnung, Steifigkeitsbasiertes Ellipsoid-Stoßmodell**

Nach Burg, et al., 2009 wurde die Kraftrechnung erstmals im Unfallrekonstruktionsprogramm SMAC verwendet, das nach McHenry, 1971 seit etwa 1970 vom Calspan Institute in den USA entwickelt wurde. Damit konnte eine Kollision erstmals zeitlich aufgelöst berechnet werden. Die Methode wurde seitdem mehrfach aufgegriffen und wird im Folgenden anhand des Unfallrekonstruktionsprogramms PC-Crash von DSD erläutert.

Für die Kraftrechnung muss das Fahrzeug durch mehrere geometrische Körper nachgebildet werden. Diese Körper bilden die Oberfläche für mögliche Kontakte des Fahrzeuges. PC-Crash verwendet hierfür Ellipsoide, wie in Abbildung 2-2 anhand eines Pkw dargestellt.



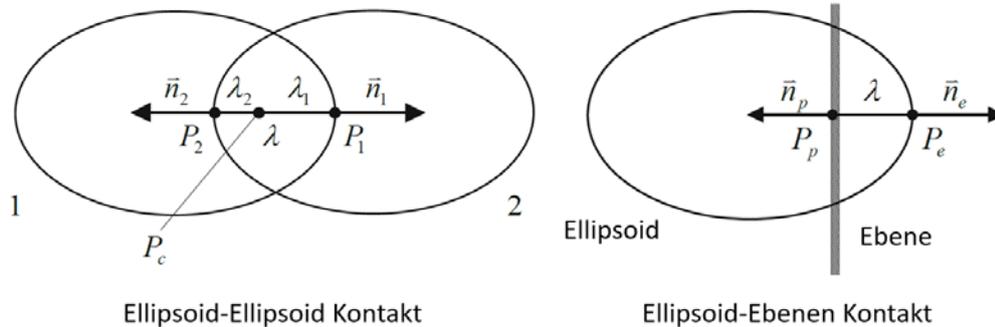
**Abbildung 2-2: Nachbildung eines Pkw durch Ellipsoide**

(DSD Dr. Steffan Datentechnik, 2018, Seite 515)

Dem Ellipsoid-Modell des Pkw werden Reibungskoeffizienten, eine Kontaktsteifigkeit und eine Stoßzahl zugewiesen. Dabei gilt die hinterlegte Kontaktsteifigkeit nur für die zwei großen Ellipsoide im unteren Teil des Pkw, für die kleinen Ellipsoide (Dach) wird ein Viertel der Kontaktsteifigkeit verwendet. (DSD Dr. Steffan Datentechnik, 2018, Seite 515 f.)

Das verwendete Kontaktmodell erkennt einen Zusammenprall mit dem Untergrund oder mit einem anderen Ellipsoid und ist in der Lage, die entstehenden Kontaktkräfte zu berechnen. Abbildung 2-3 zeigt schematisch den Zusammenprall mit einem anderen Ellipsoid und mit dem Untergrund.

-----  
 Durchführung  
 -----



**Abbildung 2-3: Kontaktmodell zwischen zwei Ellipsoiden (links) und zum Untergrund (rechts)**

(DSD Dr. Steffan Datentechnik, 2018, Seite 511 und

Mittels der bekannten Oberfläche der Ellipsoide und den senkrecht darauf stehenden Normalenvektoren  $\vec{n}$  wird die Eindringtiefe  $\lambda$  zwischen den Punkten  $P_1$  und  $P_2$  berechnet. Die dabei auf die Kollisionspartner übertragene Kraft wird nach einem linearen Federmodell mittels der hinterlegten Kontaktsteifigkeit  $K_S$  vereinfacht nach folgender Gleichung berechnet:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{K}_{S_i} * \lambda_i$$

**Gleichung 1: Kontaktkraft Federmodell**

Diese Kraft wirkt als äußere Kraft auf das Ellipsoid-Fahrzeugmodell und nimmt Einfluss auf dessen Bewegungsvariablen wie beispielsweise Beschleunigung und Geschwindigkeit. Im nächsten Zeitschritt werden erneut Position und Eindringung der Stoßpartner bestimmt. Diese Abfolge wird bis zum Ende des Stoßvorganges wiederholt. Damit kann eine Kollision zeitlich aufgelöst in diskreten Schritten berechnet werden. (DSD Dr. Steffan Datentechnik, 2018, Seite 511 ff.)

Vorteile:

Ein wesentlicher Vorteil des steifigkeitsbasierten Ellipsoid-Stoßmodells ist die zeitliche Auflösung des Stoßvorgangs. Dadurch können in jedem Zeitschritt auch Reifenkräfte berücksichtigt werden, die bei der klassischen Stoßberechnung vernachlässigt werden. Unter Nutzung der Reibungskoeffizienten zwischen Ellipsoiden und zwischen Ellipsoid und Untergrund können Abgleitkollisionen automatisch berechnet werden. Mithilfe der Stoßzahl wird die elastische Rückverformung berücksichtigt.

Nachteile:

Von Nachteil ist jedoch die geringe Anzahl der Ellipsoide, wodurch die Geometrie eines Fahrzeuges nur unzureichend dargestellt wird. Ein detaillierteres Fahrzeugmodell liefert genauere Ergebnisse, erhöht aber die benötigte Rechenzeit. Zudem wird eine konstante Kontaktsteifigkeit für alle Ellipsoide verwendet, das Dach ausgenommen. Da Bauteile eines realen Pkw je nach Material und Belastungsrichtung sehr unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen, kann das Modell den tatsächlichen Verlauf einer Kollision nur stark vereinfacht abbilden. Besonders bei Kollisionen, bei denen die Fahrzeuge nicht mittig aufeinandertreffen (Teilüberdeckung), führt dies zu Fehlern. Nach Day, 1999 bietet auch HVE (Human Vehicle Environment) von EDC mit dem EDSMAC4-Modul eine steifigkeitsbasierte Kraftrechnung an. Dabei verwendet EDSMAC4 unterschiedliche Steifigkeiten für Front, Seite und Heck, was eine Verbesserung gegenüber einer konstanten und richtungsunabhängigen Kontaktsteifigkeit darstellt. Die weiteren genannten Nachteile gelten jedoch auch hier.

### 2.1.3 Kraftrechnung, Steifigkeitsbasiertes Mesh-Modell

Das steifigkeitsbasierte Mesh-Modell in PC-Crash ist dem steifigkeitsbasierten Ellipsoid-Modell sehr ähnlich. Beide nutzen den linearen Ansatz einer Feder zur Berechnung der Kontaktkraft durch die Eindringung. Dabei gilt bei beiden Methoden ein Steifigkeitswert für das gesamte Modell. Wesentliche Unterschiede bestehen im Aufbau des Modells und in der Kontaktberechnung. (DSD Dr. Steffan Datentechnik, 2018, Seite 518 ff.)

Beim Mesh-Modell wird die Fahrzeugoberfläche durch ein Netz abgebildet. Die Knoten des Netzes können deformiert (verschoben) werden, während die Flächen dazwischen als Kontaktflächen gelten. Bei Eindringung zweier Fahrzeuge wird in ein Master- und ein Slave-Fahrzeug unterschieden. Die Knoten des Slave-Fahrzeuges werden auf die Flächen des Master-Fahrzeuges verschoben, siehe Abbildung 2-4.

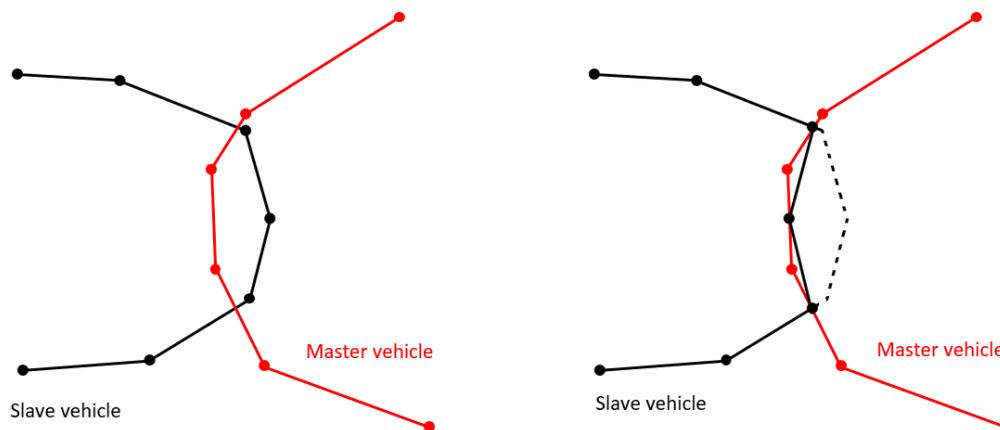


Abbildung 2-4: Mesh-Kontaktmodell vor (links) und nach (rechts) der Deformation

(DSD Dr. Steffan Datentechnik, 2018, Seite 521)

Durch diese Deformation entsteht unter Nutzung der Kontaktsteifigkeit analog zu Gleichung 1 eine Kraft. Unter Wirkung dieser Kraft wird der Bewegungszustand beider Fahrzeuge neu berechnet und die Positionen für den nächsten Iterationsschritt bestimmt. Master- und Slave-Fahrzeug wechseln in jedem Iterationsschritt. (DSD Dr. Steffan Datentechnik, 2018, Seite 518 ff.)

Nach Allen R. York, et al., 1999 wurde ein ähnliches Modell auch von EDC entwickelt und unter dem Namen DyMesh vertrieben. Wie von Day, et al., 2001 beschrieben, werden die Kontaktkräfte aus dem DyMesh-Modell in der Gesamtfahrzeugsimulation SIMON integriert und damit ebenfalls analog zu PC-Crash in der Simulation der Fahrzeugbewegung berücksichtigt.

Vorteile:

Das steifigkeitsbasierte Mesh-Modell ist in der Lage, Verformungen des Fahrzeuges abzubilden. Zudem wird der Stoß zeitlich aufgelöst berechnet, wodurch Reifenkräfte berücksichtigt werden können. Durch ein feinmaschiges Netz wird die tatsächliche Geometrie der Karosserie eines Fahrzeuges gut abgebildet.

Nachteile:

Auch dieses Modell verwendet eine konstante Kontaktsteifigkeit für das komplette Fahrzeug. Aus diesem Grund können die Ergebnisse gerade bei teilüberdeckten Kollisionen deutlich von der Realität abweichen. Auch wird die Kontaktsteifigkeit nicht richtungsabhängig variiert, was ebenfalls zu Fehlern führen kann.

### 2.1.4 Mehrkörpermodelle

Ein Mehrkörpermodell besteht aus mehreren einzelnen starren Körpern, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Jeder einzelne Körper besitzt Eigenschaften wie Masse, Geometrie, Reibungskoeffizient und Kontaktsteifigkeit.

In CARAT-4 wurde nach Fittanto, et al., 2002 ein impulsbasierter Ansatz für die Kollisionsberechnung des Mehrkörpermodells gewählt, analog zur klassischen Stoßtheorie. Verbreiteter ist jedoch der steifigkeitsbasierte Ansatz, wie er unter anderem in PC-Crash Anwendung findet. Grundsätzlich ähnelt der Ansatz dem des steifigkeitsbasierten Ellipsoid-Stoßmodells.

Im technischen Handbuch von PC-Crash (vgl. DSD Dr. Steffan Datentechnik, 2018, Seite 505 ff.) ist der Aufbau des verwendeten

Mehrkörpermodells ausführlich beschrieben:

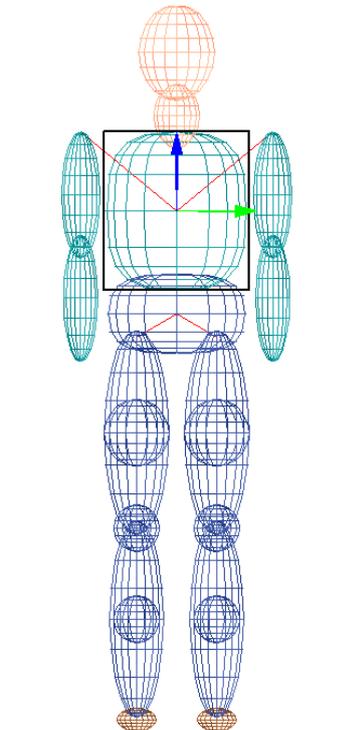
Das Mehrkörpermodell besteht aus starren Ellipsoiden n.-Ordnung, wie Abbildung 2-5 zeigt. Für jedes Ellipsoid können die kinetischen Bewegungsgleichungen aufgestellt werden. Diese Gleichungen beschreiben die Bewegung des Ellipsoids unter dem Einfluss externer Kräfte und Momente. Zusätzlich wird jedes Ellipsoid über mindestens ein Gelenk an das Mehrkörpermodell angeschlossen. Die Beschleunigungen und Kräfte im Gelenk müssen dabei für beide Körper identisch sein. Auf diese Weise wirken externe Kräfte und Momente auf das komplette Mehrkörpermodell ein. Die Kontaktkraft zum Boden oder zu anderen Ellipsoiden wird analog zum steifigkeitsbasierten Ellipsoid-Stoßmodell gebildet. Mittels numerischer Integration in diskreten Zeitschritten werden die Bewegungsgleichungen und somit der Stoßvorgang gelöst.

Vorteile:

Mithilfe des Mehrkörpermodells kann PC-Crash Kollisionen mit der Beteiligung von Fußgängern, Radfahrern und Kradfahrern berechnen sowie Insassensimulationen durchführen.

Nachteile:

Das Modell verwendet eine konstante Kontaktsteifigkeit. Das kann zu Abweichungen zwischen Simulation und Realität führen. Zudem berücksichtigt das beschriebene Mehrkörpermodell keine Deformationen. Weiterhin ist die Formgebung eines Mehrkörpermodells durch den steigenden Berechnungsaufwand bei vielen Gelenken und Körpern begrenzt.



**Abbildung 2-5:**  
Mehrkörpermodell eines  
Fußgängers (PC-Crash)

## 2.1.5 Finite Elemente Methode

Die Finite Elemente Methode (FEM) ist im Allgemeinen eine Methode, bei der Problemstellungen gelöst werden, indem sie in viele, endlich große Teile zerlegt werden. Sie wird unter anderem für Untersuchungen von Belastungen in Werkstoffen, Wellenausbreitung, elektrische Felder oder auch für Berechnungen von Kollisionen verwendet. (Vajna, et al., 2018 sowie Brand, 2016)

Aufgrund der Komplexität der Methode werden im Folgenden nur die grundlegenden Zusammenhänge anhand einer Kollisionssimulation erläutert.

Um eine FE-Simulation durchführen zu können, muss das kollidierende Fahrzeug im sogenannten *pre-processing* in ein FE-Modell, bestehend aus einer endlichen Anzahl kleiner Elemente, übersetzt werden. Dabei sind sowohl eindimensionale Elemente (Stab- und Balkenelemente), zweidimensionale Elemente (Scheiben-, Platten- oder Schalenelemente) sowie dreidimensionale Elemente (beispielsweise Tetraeder- oder Hexaederelemente) gebräuchlich. Die Anzahl der Elemente, bzw. die Feinheit des Netzes, wirkt sich auf die Genauigkeit der Ergebnisse aus, wobei die Genauigkeit bei hoher Elementzahl konvergiert. Die definierten Elemente werden über Elementknoten an angrenzende Elemente gekoppelt. (Klein, 2015 sowie Vajna, et al., 2018)

Für jedes Element können Gleichungen für den Zusammenhang zwischen Verschiebungen in den zum Element gehörenden Knoten und den Kräften im Element aufgestellt werden. Mit Hilfe dieser Kopplung der einzelnen Elemente kann für das gesamte FE-System ein Gleichungssystem aufgestellt werden. Durch die große Menge von Gleichungen bietet sich für das entstehende Gleichungssystem die Schreibweise in Matrix-Form an:

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{K}} * \underline{\underline{D}} \quad \text{Gleichung 2: Grundgleichung FEM}$$

Dabei beschreibt  $\underline{\underline{F}}$  den Vektor der von außen oder innen ins System eingepprägten Kräfte,  $\underline{\underline{K}}$  die auf der Geometrie der verwendeten Elemente basierende Gesamtsteifigkeitsmatrix des Modells und  $\underline{\underline{D}}$  den Vektor aller Knotenverschiebungen. Diese Gleichung wird anschließend nach den Verschiebungen gelöst, wodurch alle weiteren Ergebnisse wie Spannungen und Kräfte berechnet werden können. (Klein, 2015 und Gross, et al., 2009)

Abbildung 2-6 zeigt ein ausschließlich am Computer erzeugtes FE-Modell eines Pkw während einer Kollision. Die Abbildung soll den möglichen Detailgrad einer FE-Kollisionssimulation verdeutlichen.

---

Durchführung

---



**Abbildung 2-6: Berechnung einer Kollision eines Pkw mittels FEM**

(Bartl, 2020, Folie 6)

Eine Fahrzeugkollision ist aufgrund der bleibenden Verformung und des Materialversagens (fließen, reißen) von Bauteilen sowie der Kontaktbildung zwischen Bauteilen während der Kollision kein lineares Problem. Aus diesem Grund kann das Problem nur numerisch gelöst werden, wobei die Methode der expliziten Integration angewendet wird. Dabei wird in kurzen Zeitschritten eine Lösung für das Differentialgleichungssystem berechnet, welche auf den Ergebnissen des letzten Zeitschrittes basiert. Der Zeitschritt ist dabei an ein Stabilitätskriterium gebunden, welches auf der Zeitdauer einer Wellenbewegung durch das kleinste finite Element basiert. Das bedeutet, dass bei Verringerung der Elementgröße auch der Zeitschritt kleiner werden muss. Weiterhin verursachen kleinere Elemente eine höhere Elementzahl, wodurch die benötigte Rechenzeit erhöht wird. (Klein, 2015)

#### Vorteile:

Die FEM ermöglicht die Kollisionsberechnung von Fahrzeugmodellen und kann genaue Ergebnisse (Abweichung < 10 %) liefern. Dabei ist die Erstellung und Validierung der Modelle jedoch von großer Bedeutung. Die unterschiedliche Steifigkeit von Bauteilen sowie bleibende Verformungen werden detailliert dargestellt. Zudem wird der Stoßvorgang in sehr kleinen Zeitschritten aufgelöst, wodurch Kraft- und Beschleunigungsverläufe bekannt sind. (Center For Collision Safety And Analysis, 2016)

#### Nachteile:

Die Rechenzeit ist aufgrund der notwendigen hohen Anzahl von finiten Elementen größer als bei anderen Methoden. Zeitspannen von einigen Stunden bis zu einem ganzen Tag für die Berechnung einer Kollision sind auch bei aktueller Computerleistung üblich. Weiterhin veröffentlichen die Automobilhersteller die finite-Elemente-Modelle ihrer Fahrzeuge nicht. Die eigene Erstellung und Nutzung eines FE-Modells ist möglich, setzt aber sehr gute Kenntnis der Methode sowie jeglicher Materialparameter wie beispielsweise Steifigkeiten der einzelnen Bauteile eines Pkws voraus.

## 2.1.6 Methoden zur Abschätzung von Beschleunigungsverläufen bei Pkw-Kollisionen

-----  
Durchführung  
-----

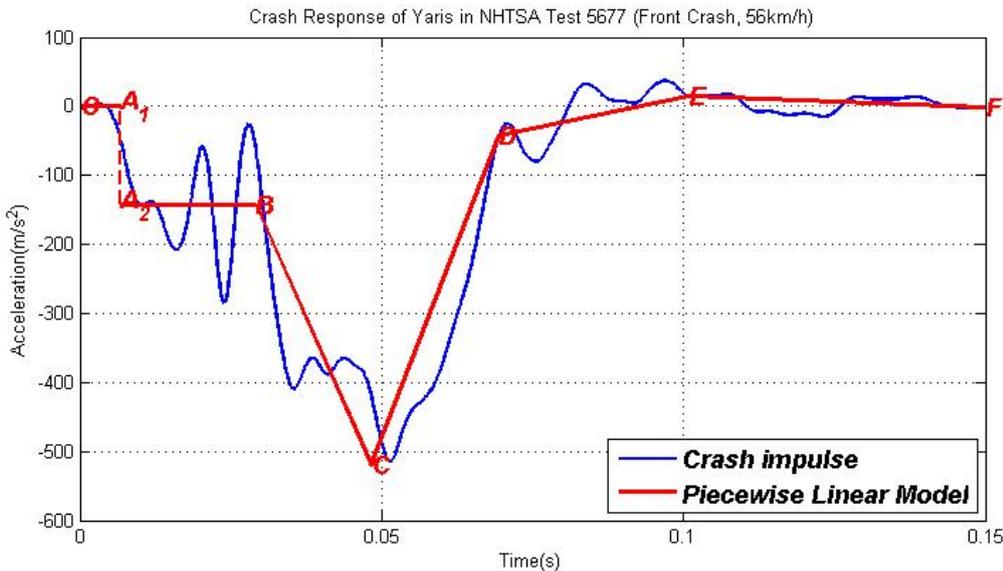
Aufgrund biomechanischer Untersuchungen sind Zusammenhänge zwischen Beschleunigungen und Verletzungen von Unfallbeteiligten bekannt. Besonders bei Pkw beeinflusst die auf das Fahrzeug wirkende Beschleunigung die Insassenbelastung. Aus diesem Grund sind Beschleunigungsverläufe eines kollidierenden Fahrzeuges ein wesentlicher Aspekt bei der Beurteilung der Unfallschwere. (Schmitt, et al., 2010)

Nach Alvarez, et al., 2017 bewerten Automobilhersteller den Nutzen ihrer Fahrerassistenzsysteme (FAS, engl. auch ADAS) anhand der voraussichtlichen Verringerung der Unfallschwere durch das FAS. Um dies zu untersuchen, werden Simulationen von Referenzsituationen ohne FAS und Simulationen derselben Situationen mit FAS verglichen. Vermeidet das FAS den Unfall der Referenzsituation, so ist die Untersuchung der Unfallschwere nicht nötig. Findet auch mit FAS eine Kollision statt, so muss die Veränderung der Unfallschwere beurteilt werden. Da zur Abschätzung der Unfallschwere Informationen über den Verlauf der Beschleunigung notwendig sind, fehlen derzeit schnelle und hinreichend genaue Simulationsmethoden. Wie bereits erläutert, sind die Methoden entweder zu ungenau oder zu zeitaufwändig. Aus diesem Grund existieren verschiedene Ansätze zur ausschließlichen Abschätzung des Beschleunigungsverlaufs während einer Kollision auf Basis ausgewählter Einflussfaktoren. Eine Auswahl von Methoden wird im Folgenden zusammengefasst.

Weiß, et al., 2015 stellen eine Abschätzung des Beschleunigungsverlaufs einer Frontalkollision eines Pkw gegen eine starre Barriere vor. Dazu wurden die Lastpfade untersucht, welche während der Kollision Kraft aufnehmen und den Verlauf der Verzögerung maßgeblich beeinflussen. Es wird die Annahme getroffen, dass die Stoßkraft im Falle einer Frontalkollision hauptsächlich durch folgenden Lastpfad aufgenommen wird: *Anbauteile – Frontstoßfänger – Crashbox – vordere Längsträger – Motor – Spritzwand.*

Basierend auf dieser Annahme kann ein aufgezeichneter Beschleunigungsverlauf eines Crashtests auf die belasteten Fahrzeugteile zurückgeführt werden, siehe Abbildung 2-7.

Durchführung



**Abbildung 2-7: Stückweise linearisierter Beschleunigungsverlauf für Frontalunfälle von Limousinen**

(Wei, et al., 2015, Seite 3)

Der linearisierte Beschleunigungsverlauf kann nach Wei, et al., 2015 in folgende vier Segmente eingeteilt werden:

- 0 – A1: Die Anbauteile werden beschädigt und der Stoßfänger deformiert. In diesem Segment wirkt keine nennenswerte Verzögerung.
- A2 – B: Die Crashbox und die Längsträger nehmen Kraft auf. Während dieser Zeit wird das Fahrzeug konstant verzögert.
- B – C – D: Die Längsträger nehmen weiterhin Kraft auf und der Motor stützt sich an der Spritzwand ab. Dadurch kommt es zu einer starken Verzögerung des Fahrzeuges.
- D – E – Ende: In der Phase der Restitution verformen sich einige Fahrzeugteile teilweise zurück und verursachen die positive Beschleunigung des Fahrzeuges.

Um den linearisierten Beschleunigungsverlauf für Berechnungen nutzen zu können, muss die Lage der Punkte A bis E bekannt sein. Diese wurde anhand von FEM-Simulationen für verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten bestimmt. Anhand der Kollisionsgeschwindigkeit der zu untersuchenden Kollision wird die Lage der Punkte A bis E interpoliert, sodass ein vereinfachter Verlauf der Beschleunigung für die zu untersuchende Kollision bekannt ist. Das Modell liefert bei Kollisionsgeschwindigkeiten zwischen 25 km/h und 56 km/h gute Ergebnisse. Allerdings reagiert das Modell sehr sensibel auf die Wahl der Lage der Punkte A bis E. Teilweise muss die Lage der Punkte händisch angepasst werden, um den Fehler zu verringern. Zudem ist das Modell auf Frontalkollisionen gegen eine starre Barriere beschränkt.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Varat, et al., 2003. Basierend auf einem gegebenen Crashtest kann der Beschleunigungsverlauf beispielsweise mittels einer Sinus-Funktion modelliert werden. Diese Funktion kann dann auf die Kollisionsgeschwindigkeit angepasst werden, um einen beliebigen Unfall zu modellieren. Nach Varat, et al., 2003 ist jedoch die Skalierung des Modells und die Anwendung auf ein spezielles Fahrzeug nicht ohne weiteres durchführbar.

Zhao, et al., 2014 stellen eine Methode zur schrittweisen Schätzung des Beschleunigungsverlaufs basierend auf einem Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System (ANFIS) vor. Mithilfe der Beschleunigungsverläufe dreier Crashtests wurde das ANFIS trainiert. Anschließend wurden die Crashtests simulativ reproduziert. Dazu schätzt das ANFIS anhand der letzten Werte des Beschleunigungsverlaufs die nächsten Werte. So entsteht schrittweise ein Beschleunigungsverlauf einer Kollision. Allerdings ist dieses mathematische Modell schlecht nachvollziehbar und die tatsächliche Nutzung unklar. Während die zum Anlernen genutzten Beschleunigungsverläufe reproduziert werden konnten, ist die Übertragungsfähigkeit der Methode nicht abschätzbar.

Schneider, et al., 2019 beschreiben eine Methode zur Abschätzung von Parametern für Feder-Dämpfer-Modelle von Fahrzeugen. Basierend auf den Parametern werden die mittlere und die maximale Beschleunigung während einer Kollision berechnet. Allerdings trifft diese Methode keine Aussage über den Verlauf der Beschleunigung. Weitere Entwicklungen und Validierungen sind hier notwendig.

### 2.1.7 Zwischenfazit

- Die klassische Stoßtheorie ist in der Lage, in kurzer Zeit die Geschwindigkeiten der Beteiligten nach der Kollision zu berechnen. Jedoch können keine Aussagen über den Beschleunigungsverlauf während der Kollision oder die resultierenden Deformationen getroffen werden.
- Mit verschiedenen vorgestellten Methoden kann ein Beschleunigungsverlauf einer Kollision abgeschätzt werden. Dabei können allerdings je nach Vereinfachungsgrad unterschiedlich große Abweichungen von der Realität entstehen. Oft sind die Modelle auf eine Stoßrichtung beschränkt. Des Weiteren berücksichtigen diese Modelle keine Deformationen der beteiligten Fahrzeuge.
- Bei der Kraftrechnung kann eine Kollision zeitlich aufgelöst berechnet und ein Beschleunigungsverlauf ausgegeben werden. Je nach Modell (Ellipsoid/Mesh) können Deformationen berechnet werden. Jedoch bilden die verwendeten Modelle die unterschiedlichen und richtungsabhängigen Steifigkeiten von Pkw-Bauteilen nur unzureichend ab. Dadurch können Abweichungen zwischen Simulation und Realität entstehen.
- Die Finite Elemente Methode (FEM) erzielt sehr genaue Ergebnisse und kann sowohl Beschleunigungsverläufe als auch Deformationen berechnen. Allerdings nimmt die Rechenzeit mit der Genauigkeit zu, sodass mehrere Stunden bis Tage für eine Berechnung notwendig sind.
- Das Energy Equivalent Speed (EES)-Modell eines Pkw repräsentiert hochaufgelöst und dreidimensional die weichen und steifen Bereiche eines Pkw. Dennoch ist es wesentlich einfacher aufgebaut als ein vergleichbares FEM-Modell. Zudem ist das Modell nach Karosserieform und Stoßrichtung gruppiert, sodass Unterschiede in den Steifigkeiten berücksichtigt werden. Dieses Modell bietet die Grundlage für eine neuartige, schnelle und detaillierte Stoßberechnungsmethode.

## 2.2 AP 3.3 Erarbeitung eines neuen Kollisionsberechnungsansatzes auf reinen Deformationsenergiemodell Daten

Um eine neuartige Methode zur Stoßberechnung basierend auf dem Energy Equivalent Speed (EES)-Modell nach Erbsmehl zu entwickeln, ist eine Unterteilung in mehrere Schritte notwendig.

Im ersten Schritt werden die Grundzusammenhänge der Methode zweidimensional entwickelt. Dazu werden zuerst die Bewegungsvariablen eines betrachteten Objektes definiert. Anschließend wird die zweidimensionale Stoßberechnungsmethode anhand des geraden, zentrischen Stoßes und des schrägen, exzentrischen Stoßes gegen eine starre, nicht deformierbare Barriere vorgestellt. In einem kurzen Fazit wird die erste Forschungsfrage beantwortet.

Im zweiten Schritt wird die Methode auf einen dreidimensionalen Pkw übertragen. Erneut werden zuerst die Bewegungsvariablen des Pkw definiert und anschließend die Adaption der zweidimensionalen Stoßberechnungsmethode beim Stoß eines Pkw gegen eine starre, nicht deformierbare Barriere erläutert. Am Ende des zweiten Schrittes wird die zweite Forschungsfrage beantwortet.

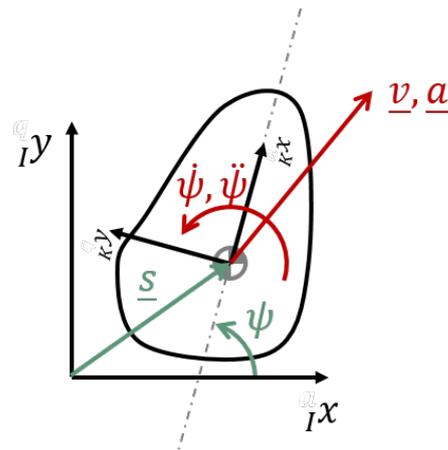
Im dritten Schritt wird die Methode dahingehend erweitert, dass Variablen zur Validierung der Berechnung ausgegeben werden können. Das ermöglicht erstmals, die Ergebnisse der entwickelten Berechnungsmethode zu validieren. Dazu wird die Kollision gegen eine starre, nicht deformierbare Barriere mit verschiedenen Crashtests verglichen. Abschließend kann die dritte Forschungsfrage beantwortet werden.

Der vierte Schritt befasst sich mit der Übertragung der entwickelten Methode auf den Stoß zweier Energy Equivalent Speed (EES)-Modelle eines Pkw.

### 2.2.1 Zweidimensionale Bewegung eines Objektes

In diesem Kapitel werden die verwendete Nomenklatur der Variablen definiert sowie getroffene Vereinfachungen und Entscheidungen dokumentiert.

Sämtliche Variablen werden in einem globalen Inertial-Koordinatensystem berechnet. Über die Position des Schwerpunktes des Objektes und den Winkel zum Objekt-Koordinatensystem können die globalen Variablen in lokale Variablen umgerechnet werden und umgekehrt. Abbildung 2-8 zeigt die zur Beschreibung der Bewegung notwendigen Variablen.



**Abbildung 2-8:**  
Bewegungsvariablen der  
ebenen Bewegung

Die in der ebenen Bewegung verwendeten Variablen sind zusätzlich in Tabelle 2-1 erläutert.

**Tabelle 2-1: Erläuterung der Bewegungsvariablen der ebenen Bewegung eines starren Körpers**

Formelzeichen und Einheit	Bezeichnung	Erläuterungen
${}^I x, {}^I y$ [-]	globales Inertial-Koordinatensystem	Dieses Koordinatensystem ist raumfest. Es wird zur Beschreibung aller Bewegungsvariablen genutzt.
${}^K x, {}^K y$ [-]	lokales Objekt-Koordinatensystem	Dieses Koordinatensystem ist fest mit dem Schwerpunkt des Objektes verbunden, es bewegt und dreht sich mit.
$\underline{s} = \begin{bmatrix} {}^I x_K \\ {}^I y_K \end{bmatrix}$ [m]	Position des Objektschwerpunktes	
$\underline{v} = \begin{bmatrix} {}^I v_{K_x} \\ {}^I v_{K_y} \end{bmatrix}$ $\left[ \frac{m}{s} \right]$	Geschwindigkeit des Objektschwerpunktes	
$\underline{a} = \begin{bmatrix} {}^I a_{K_x} \\ {}^I a_{K_y} \end{bmatrix}$ $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$	Beschleunigung des Objektschwerpunktes	Die Beschleunigung wird innerhalb eines Berechnungsabschnitts als konstant angenommen.
$\psi$ [rad]	Winkel des Objekt-Koordinatensystems um die z-Achse des Inertialsystems	
$\dot{\psi}$ $\left[ \frac{rad}{s} \right]$	Winkelgeschwindigkeit des Objekt-Koordinatensystems	
$\ddot{\psi}$ $\left[ \frac{rad}{s^2} \right]$	Winkelbeschleunigung des Objekt-Koordinatensystems	Die Beschleunigung wird innerhalb eines Berechnungsabschnitts als konstant angenommen.

## 2.2.2 Entwicklung der zweidimensionalen Stoßberechnungsmethode für EES-Modelle

Durchführung

Die Anwendung der im Folgenden entwickelten Stoßberechnungsmethode beginnt zum Zeitpunkt der Kollision zweier Objekte. Dabei ist es für die folgenden methodischen Betrachtungen irrelevant, wie die beiden Objekte zum Kollisionsort gelangt sind. Lediglich die Bewegungsvariablen beider Objekte zum Zeitpunkt der Kollision werden als initiale Werte benötigt. Zusätzlich ist Folgendes zu beachten: Die hier entwickelte Stoßberechnungsmethode kann nur angewendet werden, wenn mindestens eines der kollidierenden Objekte deformierbar ist und durch ein (EES)-Modell nach Erbsmehl repräsentiert wird. Für die folgenden Erläuterungen zur zweidimensionalen Entwicklung der Methode wird von einer Kollision eines deformierbaren Objektes gegen ein starres, nicht deformierbares Objekt ausgegangen. Der Ansatz der entwickelten Berechnungsmethode für die **plastische Kompressionsphase** basiert auf einer Zerlegung in kleine Zeitschritte, fortan Iterationsschritte genannt. Dabei werden in jedem Iterationsschritt mechanische Grundsätze angewendet, um die Stoßkräfte auf die stoßenden Objekte wirken zu lassen. Zusätzlich kann der Ablauf eines Iterationsschrittes in vier Teilschritte untergliedert werden, siehe Abbildung 2-10.

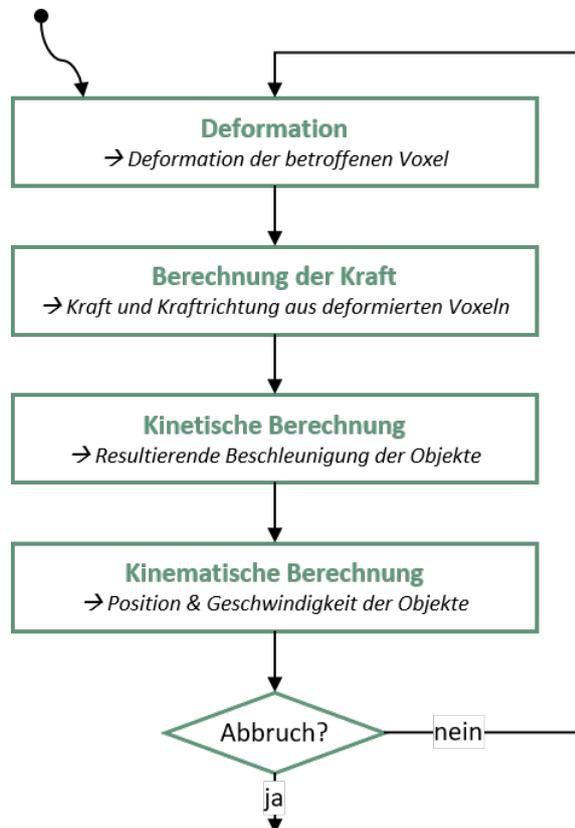


Abbildung 2-9: Ansatz der Stoßberechnungsmethode

Der Einstieg in das nebenstehende Schema erfolgt über den schwarzen Punkt. Die kollidierenden Objekte treffen mit initialer Geschwindigkeit am Kollisionsort ein. In der Folge wird identifiziert, welche Voxel eines EES-Modells in diesem Iterationsschritt deformiert werden müssen. Bei der Kollision mit einem starren Objekt werden beispielsweise alle Voxel deformiert, die in die Geometrie des starren Körpers eindringen.

Auf Grundlage der deformierten Voxel werden die Richtung und der Betrag der in diesem Iterationsschritt wirkenden Stoßkraft abgeleitet.

Diese Kraft wirkt wiederum auf die kollidierenden Objekte. Nach kinetischen Zusammenhängen werden die resultierenden Beschleunigungen der Objekte berechnet.

Die errechneten Beschleunigungen wirken über kinematische Zusammenhänge auf die Geschwindigkeit und die Position der Objekte ein. Nach einer abschließenden Prüfung der Abbruchbedingung kann gegebenenfalls der nächste Iterationsschritt beginnen.

Dieser basiert nun auf den soeben berechneten Positionen und Geschwindigkeiten der Objekte, wodurch eventuell erneut Voxel deformiert werden.

Der dargestellte Ablauf wird so lange wiederholt, bis die Abbruchbedingung erfüllt ist.

Diese ist für den hier dargelegten Ansatz wichtig, weswegen sie am Ende des folgenden Kapitels erneut aufgegriffen wird.

Abschließend werden die Phasen der **elastischen Kompression** und der **elastischen Restitution** durchlaufen. Der in beiden Phasen umgewandelte Stoßantrieb wird auf Grundlage einer gegebenen Stoßzahl  $\varepsilon$  berechnet und ist somit bekannt.

---

Durchführung

---

### 2.2.2.1 Gerader, zentrischer Zusammenstoß

Durchführung

Der soeben entwickelte Ansatz wird nun auf den geraden, zentrischen Zusammenstoß eines deformierbaren Objektes mit einem starren, nicht deformierbaren Objekt (z.B. eine Mauer) angewendet.

Objekt A ist ein bewegliches, deformierbares Objekt, das durch ein EES-Modell repräsentiert wird. Zur besseren Übersicht ist das EES-Modell in Abbildung 2-11 nicht dargestellt. Objekt A besitzt die initiale Position  $\underline{s}_0$  und die initiale Geschwindigkeit  $\underline{v}_0$ .

Objekt B dagegen ist starr und zudem nicht deformierbar, daher wird für Objekt B kein EES-Modell benötigt. Da Objekt B unbeweglich ist, wurde auf die Darstellung des Schwerpunktes, der initialen Position und der initialen Geschwindigkeit verzichtet.

Abbildung 2-11 zeigt beide Objekte beispielhaft zum Zeitpunkt des Erstkontaktes.

Mit den initialen Bewegungsvariablen wird in den ersten Iterationsschritt der **plastischen Kompression**

eingestiegen. Wie in nebenstehender Abbildung erkennbar ist, findet jedoch noch keine Überlappung der Objekte statt. Daher werden keine Voxel deformiert, wodurch keine Kraft auf die Körper wirkt. Die initialen Geschwindigkeiten werden beibehalten und beide Körper werden kinematisch für eine bestimmte Zeit  $t_{step}$  weiterbewegt.

Dabei stellt  $t_{step}$  sicher, dass sich beide Körper nach dieser Zeit um eine Voxeldimension überlappen. Dazu wird  $t_{step}$  am Ende jedes Iterationsschrittes auf Grundlage der soeben berechneten

Geschwindigkeiten aktualisiert. Diese Verfahrensweise entspricht dem expliziten Lösungsverfahren von Courant, et al., 1928 definierte CFL-Kriterium zur Bestimmung des stabilen Zeitschritts angewendet wird. Der Zeitschritt gilt als stabil, wenn für die Geschwindigkeit  $u$ , den Zeitschritt  $\Delta t$  und den Weg  $\Delta x$  gilt:

$$CFL = \frac{u * \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

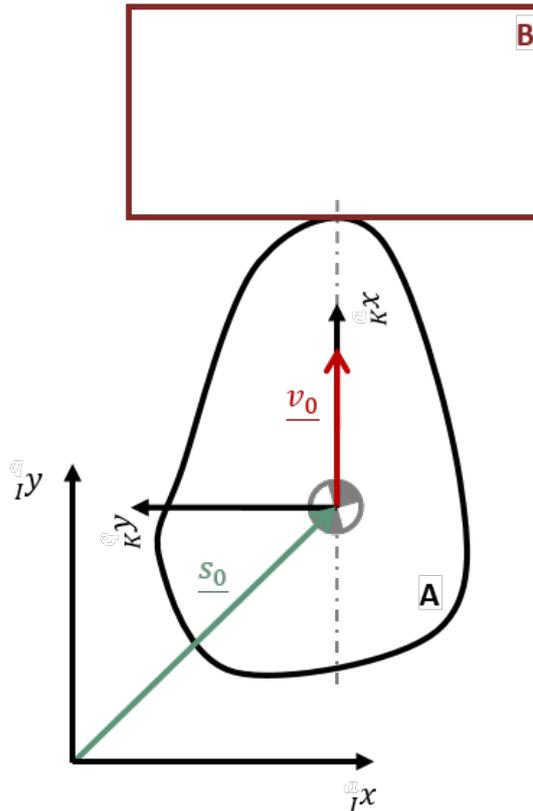


Abbildung 2-10: gerader, zentrischer Stoß, Bild 1

Gleichung 3: allgemeine Definition des CFL-Kriteriums

Objekt A trifft auf Objekt B, wodurch einige der beispielhaft dargestellten Voxel deformiert werden (grün). Der Betrag der daraus resultierenden Stoßkraft kann aus den deformierten Voxeln berechnet werden. Zur vollständigen Definition des Kraftvektors werden auch der Kraftangriffspunkt und die Richtung definiert.

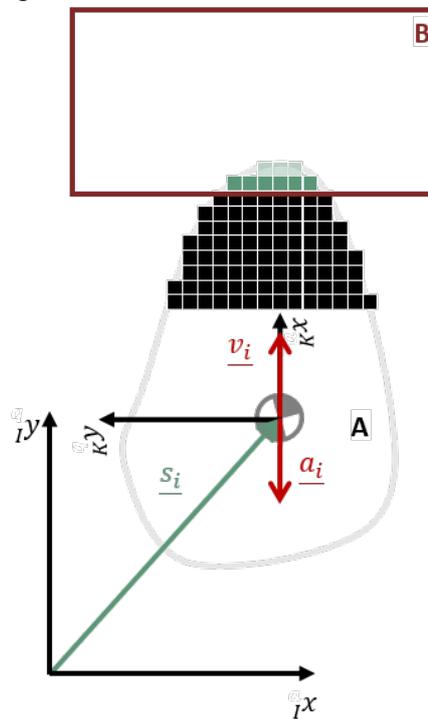
Anschließend wird die aus der Stoßkraft  $\underline{F}_{K_i}$  resultierende Beschleunigung durch kinetische Zusammenhänge berechnet. Anschließend werden die Objekte innerhalb der Zeit  $t_{step}$  unter Wirkung der resultierenden Beschleunigung und unter Nutzung kinematischer Gleichungen weiterbewegt:

Sowohl die Geschwindigkeit als auch die Position von Objekt A verändern sich und schaffen neue Ausgangsbedingungen für den nächsten Iterationsschritt. Da Objekt B unbeweglich ist, zeigt  $\underline{F}_{K_i}$  keine Wirkung auf das Objekt. Abbildung 2-14 stellt dies grafisch dar.

Nach der kinematischen Berechnung erfolgt die Prüfung der Abbruchbedingung. Diese bestimmt den Übergang von plastischer Kompression zu elastischer Kompression. Ist diese nicht erfüllt, wird in den nächsten Iterationsschritt eingestiegen.

Nach Abbruch der Phase I beginnt die Phase der **elastischen Kompression**. Analog zum Vorgehen während der plastischen Kompression wird aus dem Stoßantrieb unter Berücksichtigung von  $t_{step}$  der Betrag  $F_{K_{el}}$  der Stoßkraft der elastischen Kompression berechnet. Zudem wird angenommen, dass sich Richtung und Kraftangriffspunkt seit der letzten Iteration der plastischen Kompression nicht verändert haben, sodass der Kraftvektor  $\underline{F}_{K_{el}}$  bekannt ist. Daraus wird erneut die resultierende Beschleunigung berechnet und beide Objekte werden während  $t_{step}$  weiterbewegt.

Daraufhin erfolgt der Übergang in die **elastische Restitutionsphase** (Phase III). Für diese Phase wird die gleiche Berechnungsvorschrift genutzt wie für Phase II. Am Ende von Phase III trennen sich beide Objekte voneinander. Eine beliebige kinetische Simulation kann angewendet werden, um bis in die Endlagen der Objekte zu simulieren. Darauf wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Der gerade, zentrische Stoßvorgang gegen eine starre, nicht deformierbare Barriere ist somit abgeschlossen.



Durchführung

Abbildung 2-11:  
gerader, zentrischer  
Stoß, Bild 4

### 2.2.2.2 Schräger, exzentrischer Zusammenstoß

Aufbauend auf dem vorherigen Kapitel wird die entwickelte Berechnungsmethode auf einen schrägen, exzentrischen Stoß übertragen. Die Objekte A und B sind analog zum geraden, zentrischen Stoß definiert. Unterschiede bestehen in der kinematischen Konfiguration von Objekt A und in der Anstoßsituation, die dem Erstkontakt in Abbildung 2-15 entnommen werden können. Objekt A unterliegt nun nicht nur der Translation, sondern auch gleichzeitig der Rotation. Auf Grundlage der Relativgeschwindigkeit der Schwerpunkte beider Objekte wird  $t_{step}$  berechnet. Anschließend wird mit dem ersten Iterationsschritt in die **plastische Kompressionsphase** eingestiegen. Aufgrund der fehlenden Deformationen werden beide Objekte anhand ihrer initialen Geschwindigkeiten weiterbewegt.

Erst im folgenden Iterationsschritt kommt es zur Überlappung der Objekte. Zuerst werden die zu deformierenden Voxel identifiziert. Erneut wird die Stoßkraft  $F_{K_i}$  berechnet. Die Wirkungslinie der Stoßkraft durchsticht in diesem Fall jedoch nicht den Schwerpunkt. Aus diesem Grund ergeben sich sowohl eine translatorische Beschleunigung als auch eine rotatorische Beschleunigung nach dem Drallsatz für die ebene Bewegung.

Die translatorische Beschleunigung  $\underline{a}_i$  und die rotatorische Beschleunigung  $\underline{\ddot{\psi}}_i$  wirken nach den bereits bekannten kinematischen Zusammenhängen auf Objekt A ein. Geschwindigkeiten und Positionen können neu berechnet sowie die Abbruchbedingungen überprüft werden.

Abschließend wird  $t_{step}$  aufgrund der veränderten Geschwindigkeiten aktualisiert.

Der Abbruch der plastischen Kompressionsphase sowie die Berechnung der elastischen Kompression und Restitution erfolgt analog zum geraden, zentrischen Stoß. Somit ist die Adaption der Stoßberechnungsmethode auf einen schrägen, exzentrischen Stoß abgeschlossen.

Durchführung

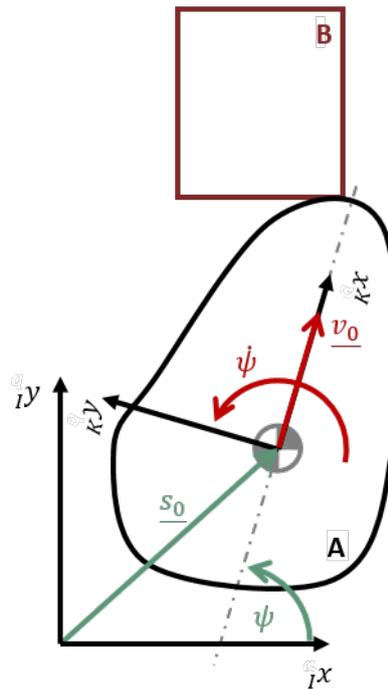


Abbildung 2-12:  
schräger, exzentrischer  
Stoß, Bild 1

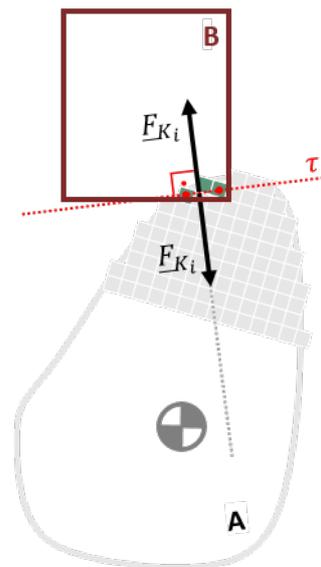


Abbildung 2-13:  
schräger, exzentrischer  
Stoß, Bild 2

### 2.2.2.3 Zwischenfazit

Die hier entwickelte Stoßberechnungsmethode verwendet das Energy Equivalent Speed (EES)-Modell nach Erbsmehl, um den Stoß zeitlich aufgelöst zu betrachten. Die Unterteilung eines Stoßvorgangs in die drei Phasen plastische Kompression, elastische Kompression und elastische Restitution ermöglicht die Berechnung der während des Stoßes auf die Objekte wirkenden Kräfte. Während der Phase der plastischen Kompression werden schrittweise mechanische Grundlagen unter Nutzung des EES-Modells angewendet. Das Modell wird dabei deformiert und die notwendige plastische Deformationsenergie über kinetische Zusammenhänge in eine resultierende Beschleunigung umgewandelt. Im Ergebnis gleichen sich die Geschwindigkeiten der Stoßpartner stetig weiter an, bis die Phase der elastischen Kompression durchlaufen wird und sie durch die elastische Restitution wieder voneinander getrennt werden. Die in dieser Arbeit entwickelte Stoßberechnungsmethode wird im Folgenden auf ein dreidimensionales EES-Modell eines Pkw übertragen.

### 2.2.3 Dreidimensionale Bewegung eines Pkw

Durchführung

In Abbildung 2-17 und Tabelle 2-2 werden die verwendeten Bewegungsvariablen dokumentiert.

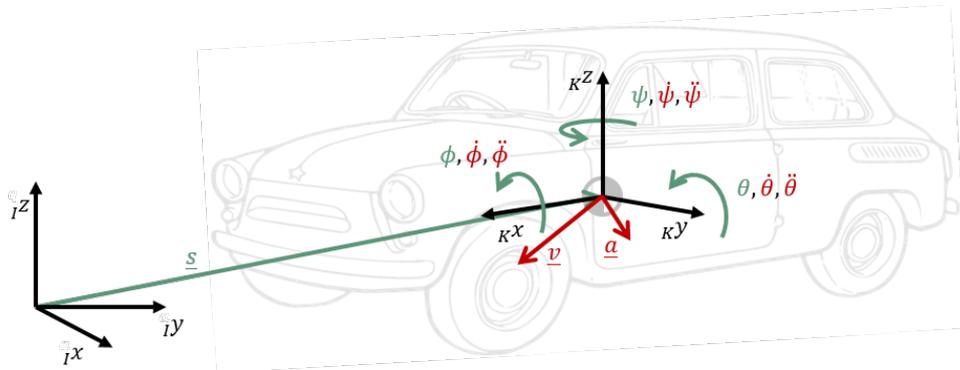


Abbildung 2-14: Bewegungsvariablen der dreidimensionalen Bewegung eines Pkw

Tabelle 2-2: Erläuterung der Bewegungsvariablen der dreidimensionalen Bewegung eines Pkw

Formelzeichen und Einheit	Bezeichnung	Erläuterungen
$iX, iY, iZ$ [-]	globales Inertial-Koordinatensystem	In diesem raumfesten Koordinatensystem werden alle Bewegungsvariablen beschrieben.
$KX, KY, KZ$ [-]	lokales Objekt-Koordinatensystem	Dieses Koordinatensystem ist fest mit dem Schwerpunkt des Objektes verbunden, es bewegt und dreht sich mit.
$\underline{s} = \begin{bmatrix} iX_K \\ iY_K \\ iZ_K \end{bmatrix}$ [m]	Position des Objektschwerpunktes	
$\underline{v} = \begin{bmatrix} iV_{Kx} \\ iV_{Ky} \\ iV_{Kz} \end{bmatrix}$ [ $\frac{m}{s}$ ]	Geschwindigkeit des Objektschwerpunktes	
$\underline{a} = \begin{bmatrix} iA_{Kx} \\ iA_{Ky} \\ iA_{Kz} \end{bmatrix}$ [ $\frac{m}{s^2}$ ]	Beschleunigung des Objektschwerpunktes	Die Beschleunigung wird innerhalb einer Iteration als konstant angenommen.
$\underline{\beta} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$ [rad]	Winkel des Objekt-Koordinatensystems bezogen auf das Inertialsystem	$\phi$ ... Wankwinkel $\theta$ ... Nickwinkel $\psi$ ... Gierwinkel
$\underline{\dot{\beta}} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$ [ $\frac{rad}{s}$ ]	Winkelgeschwindigkeit des Objekt-Koordinatensystems	
$\underline{\ddot{\beta}} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}$ [ $\frac{rad}{s^2}$ ]	Winkelbeschleunigung des Objekt-Koordinatensystems	Die Beschleunigung wird innerhalb einer Iteration als konstant angenommen.

## 2.2.4 Übertragung der Stoßberechnungsmethode auf ein dreidimensionales EES-Modell

Durchführung

Nach der Entwicklung der zweidimensionalen Stoßberechnungsmethode wird diese nun in den dreidimensionalen Raum übertragen. Dazu wird die Methode auf den dreidimensionalen, schrägen und exzentrischen Stoß eines Pkw gegen eine starre, nicht deformierbare Barriere (z.B. eine Mauer) angewendet.

### 2.2.4.1 Schräger, exzentrischer Zusammenstoß

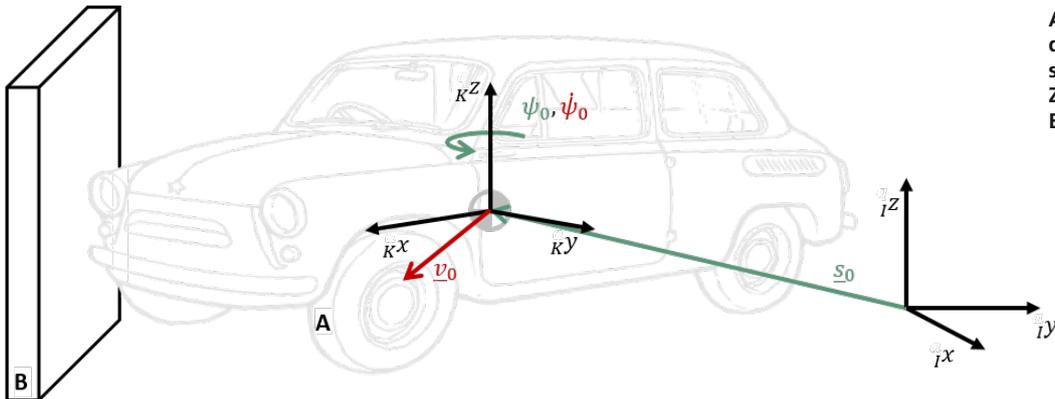


Abbildung 2-15: dreidimensionaler, schräger, exzentrischer Zusammenstoß, Erstkontakt

Betrachtet wird der Stoß des beweglichen, deformierbaren Pkw A gegen ein starres, nicht deformierbares Objekt B. Der Pkw A besitzt eine initiale Geschwindigkeit  $\underline{v}_0$  und die Rotationsgeschwindigkeit  $\psi_0$  um seine lokale z-Achse. Das Objekt B ist unbeweglich, weswegen dessen Schwerpunkt und dessen initiale Bewegungsvariablen nicht dargestellt sind. Abbildung 2-18 zeigt die beiden kollidierenden Objekte bei Erstkontakt.

Ein wesentliches Merkmal der EES-Modelle ist, dass diese unter anderem nach den ersten beiden Stellen der Collision Deformation Classification (CDC) gruppiert wurde. Die ersten beiden Stellen der CDC beschreiben die prinzipielle Richtung der während des Stoßes wirkenden Kraft (PDOF). Diese Richtung muss für die Auswahl des passenden EES-Modells bekannt sein. Um die PDOF abzuschätzen, werden die Einlaufimpulse  $\underline{p}_0$  der beteiligten Objekte ausgewertet. Da in diesem Kapitel von einem Stoß gegen ein unbewegliches Objekt ausgegangen wird, wird die PDOF ausschließlich durch den Einlaufimpuls des Pkw bestimmt (siehe Abbildung 2-19).

Aufgrund der bis zum Erstkontakt unbekanntem PDOF kann das richtige EES-Modell eines Pkw erst identifiziert werden, wenn der Erstkontakt bereits erfolgt ist.

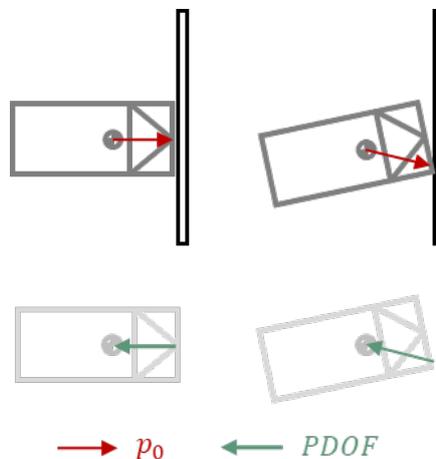
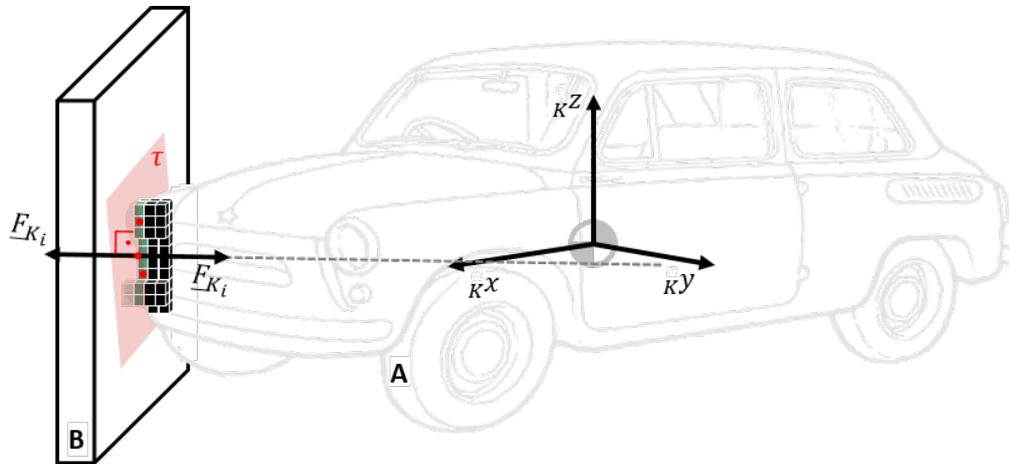


Abbildung 2-16: PDOF gegen Barriere

Nachdem das passende EES-Modell identifiziert und geladen wurde, beginnt die Phase der **plastischen Kompression**. Analog zum bisherigen Vorgehen werden die Iterationsschritte durchlaufen, bis die Abbruchbedingung positiv ist. Um die entwickelte Stoßberechnungsmethode auf einen dreidimensionalen Stoß zu übertragen, wird eine Iteration im Detail untersucht. Dazu wird das EES-Modell eines Pkw beispielhaft in den Umriss skizziert und im Freischnitt eines Iterationsschritts in Abbildung 2-17 dargestellt.



**Abbildung 2-17:**  
dreidimensionaler, schräger,  
exzentrischer  
Zusammenstoß, Freischnitt  
einer Iteration

Die obenstehende Abbildung zeigt, dass Objekt A (Pkw) auf Objekt B (Mauer) trifft und sich verformt. Auf Grundlage der deformierten Voxel kann die Stoßkraft  $\underline{F}_{K_i}$  bestimmt werden.

Anschließend wird mittels kinetischer Zusammenhänge untersucht, wie die Stoßkraft  $\underline{F}_{K_i}$  auf den Pkw wirkt. Da ein schräger, exzentrischer Stoß vorliegt, werden sowohl Translation als auch Rotation beeinflusst.

Um auch Stöße mit geringen Stoßkräften berechnen zu können, werden die Reifenkräfte eines Pkw bei den folgenden kinetischen Berechnungen berücksichtigt. Da jedoch innerhalb dieses Projektes aufgrund des hohen Zeitbedarfs keine Vertikaldynamik eines Pkw implementiert wurde, beschränken sich die Reifenkräfte auf die statischen Reifenaufstandskräfte in Abhängigkeit der Lage des Schwerpunkts sowie die Reibungskräfte zwischen Reifen und Boden.

Die Reifenaufstandskräfte können anhand von Momentengleichgewichten berechnet werden. Für die Hinterachse zeigen dies die folgenden Formeln:

$$F_{HA} = \frac{l_v}{l_{12}} * m_{Pkw} * g$$

**Gleichung 4: Berechnung der Hinterachslast**

$$F_{HAR} = \frac{b - e}{b} * F_{HA}$$

**Gleichung 5: Berechnung der Radlast hinten rechts**

$$\underline{F}_{HR} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{HAR} \end{pmatrix}$$

**Gleichung 6: Vektor der Radaufstandskraft hinten rechts**

Zur Berechnung müssen die Masse  $m_{Pkw}$ , der Radstand  $l_{12}$ , der Abstand des Schwerpunktes zur Vorderachse  $l_v$ , die mittlere Spurweite  $b$  sowie die Exzentrizität des Schwerpunktes bezogen auf die Fahrzeuglängsachse  $e$  gegeben sein. Die Erdbeschleunigung wird mit  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$  angenommen.

Unter Berücksichtigung der Reifenaufstandskräfte und eines Reibungskoeffizienten  $\mu$  kann der maximale Betrag der Reibkraft eines Reifens berechnet werden durch:

$$F_{RHR} = \mu * F_{HAR}$$

Gleichung 7: maximale Reibkraft hinten rechts

Durchführung

Reibkräfte wirken ausschließlich in der Aufstandsebene des Reifens, also stets senkrecht zu den Reifenaufstandskräften. Zudem wirken Reibkräfte immer entgegen der Relativgeschwindigkeit der Reibpartner. Durch die Berechnung der Geschwindigkeit des Radaufstandspunktes wird die Richtung der maximalen Reibkraft bestimmt. Diese Richtung gilt jedoch nur für den vollverzögerten oder blockierten Reifen. Ist der Reifen in Reifenlängsrichtung nur teilweise gebremst, so muss der Vektor der Reibkraft in je eine Komponente in Reifenlängsrichtung  $F_{RHR_L}$  und Reifenquerrichtung  $F_{RHR_Q}$  zerlegt werden. Die Komponente  $F_{RHR_L}$  muss dann durch den Teilbremsfaktor  $TB = [0; 1]$  verringert werden, wobei stets die Rollreibung des Reifens berücksichtigt wird. Der sich daraus ergebende Vektor der Reibkraft (dunkelgrün) wird in Abbildung 2-21 beispielhaft für das rechte Hinterrad dargestellt.

Somit sind sowohl der Vektor der Stoßkraft als auch die Vektoren der vier Radaufstandskräfte  $F_{N_j}$  und der daraus resultierenden vier Reibkräfte  $F_{R_j}$  bekannt. Die Vektoren  $r_{Rad_j}$  vom Schwerpunkt zu den Radaufstandspunkten sind ebenfalls gegeben. Damit können, mit dem Schwerpunktsatz und dem Drallsatz, die resultierende Beschleunigung  $\underline{a}_i$  und die resultierende Winkelbeschleunigung  $\underline{\beta}_i$  berechnet werden.

Da das Massenträgheitsmoment um die z-Achse eines Pkw oft unbekannt ist, wird es im Rahmen dieses Projektes mit einer Näherungsformel nach Fundowicz, et al., 2018 abgeschätzt:

$$\Theta_{zz} = 0,279 * l_{12}^{0,166} * b^{0,042} * H^{0,357} * m^{0,798} * h_{CG}^{-0,343} * L^{1,829}$$

Gleichung 8: Massenträgheitsmoment Pkw um die z-Achse, Näherungsformel nach Fundowicz, et al. 2018

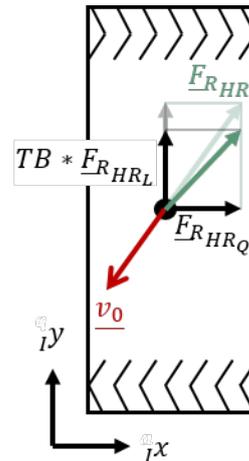


Abbildung 2-18: Berechnung der Reibkräfte

Dabei bezeichnen  $H$  die Fahrzeughöhe,  $h_{CG}$  die Höhe des Fahrzeugschwerpunkts über dem Boden und  $L$  die Länge des Fahrzeugs.

Nachdem die resultierenden Beschleunigungen berechnet wurden, können beide Objekte um die Zeit  $t_{Step}$  weiterbewegt werden. Der weitere Ablauf der Iterationsschritte und die Abbruchbedingungen können vom ebenen, schrägen und exzentrischen Stoß ohne weitere Anpassungen übertragen werden.

Auch die Phase der **elastischen Kompression** und die Phase der **elastischen Restitution** werden analog der hier übertragenen Berechnungsmethode durchlaufen. Damit ist der Stoßvorgang eines dreidimensionalen, schrägen und exzentrischen Stoßes abgeschlossen.

#### 2.2.4.2 Zwischenfazit

Die entwickelte Stoßberechnungsmethode ist in der Lage, einen dreidimensionalen Stoßvorgang eines Pkw zu berechnen. Folgende Vorteile, Randbedingungen und Einschränkungen liegen vor:

- Durch die Bewertung des Einlaufimpulses des Pkw wird abgeschätzt, aus welcher Richtung die Kraft während des Stoßvorgangs auf den Pkw einwirkt. Daher kann das passende EES-Modell ausgewählt und stoßrichtungsabhängige Steifigkeitsunterschiede durch das EES-Modell berücksichtigt werden.
- Für die Berechnung sind mehrere Eingabeparameter nötig. Dazu zählen umfassende Informationen über den simulierten Pkw (Maße, Masse, Lage des Schwerpunktes, Radstand, Spurbreite), die Stoßzahl  $\epsilon$ , ein Reibwert zwischen Reifen und Untergrund sowie Teilbremsfaktoren für jedes Rad des simulierten Pkw.
- Durch die Berücksichtigung der statischen Reifenaufstandskräfte und der Reibungskräfte am Reifen ist die Berechnungsmethode in der Lage, auch Kollisionen mit geringen Geschwindigkeiten abzubilden. Dabei sind zusätzlich radspezifische Teilbremsfaktoren implementiert.
- Bisher sind keine detaillierten Reifenmodelle in der Berechnungsmethode umgesetzt. Zudem stehen Räder stets parallel zur Fahrzeuglängsrichtung.
- Bei dem Stoßvorgang wird keine Reibung zwischen den Stoßpartnern berücksichtigt.
- Stöße, bei denen Stoßpartner verhaken, können ebenso dargestellt werden wie Stöße, bei denen die Stoßpartner aneinander abgleiten. Hierbei definieren die Kontur der beiden Stoßpartner sowie die Steifigkeit hervorstehender Teile den Ablauf der Kollision.
- Durch die Implementierung der drei Stoßphasen, basierend auf der Stoßzahl  $\epsilon$ , können elastische, plastische und teilelastische Stöße abgebildet werden.
- Die Bestimmung des Vektors der Stoßkraft erfolgt dreidimensional, wodurch die Einwirkung der Stoßkraft auf die Vertikaldynamik eines Pkw vorbereitet ist.
- Derzeit ist keine Vertikaldynamik implementiert. Da die Vertikaldynamik ein Feder-Dämpfer-Modell für jeden Reifen voraussetzt, wurde diese aus Gründen des Zeitaufwandes nicht berücksichtigt. Dadurch können bei geeigneten starren Objekten, wie beispielsweise Rampen, große Abweichungen entstehen. Allerdings kann die Berechnungsmethode jederzeit nachträglich um die Vertikaldynamik erweitert werden.
- Bedingt durch die Modellbildung enthält das EES-Modell nach Erbsmehl auch Energiewerte im Fahrgastraum. Diese führen bei Eindringung in den Fahrgastraum, beispielsweise bei seitlichen Kollisionen, zu Abweichungen von der Realität. Eine Berechnung mit einer zweidimensionalen Projektion des EES-Modells behebt diese Einschränkung.
- Bedingt durch die Deformationsvorschrift werden nur Voxel deformiert, welche sich im direkten Kontakt mit dem gestoßenen Objekt befinden. Bei teilüberdeckten Kollisionen kommt es dadurch zu Abweichungen zwischen Realität und Berechnung. Eine Vorschrift zur Deformation umliegender Voxel behebt diese Einschränkung, erhöht jedoch bei dreidimensionaler Betrachtung die Rechenzeit enorm.

Für eine vollständig dreidimensionale Simulation eines kollidierenden Fahrzeuges sind zusätzliche Problemstellungen zu lösen, welche im Rahmen dieses Projektes nicht realisierbar sind. Aufgrund der genannten Einschränkungen und Einsatzgrenzen der dreidimensionalen Stoßberechnungsmethode wird in den folgenden Kapiteln der zweidimensionale Ansatz weiterverfolgt.

## 2.2.5 Übertragung der entwickelten Methode auf den Stoß zweier Pkw-EES-Modelle

Im Folgenden wird der Zusammenstoß eines deformierbaren, beweglichen Objektes A (Pkw) mit einem weiteren deformierbaren, beweglichen Objekt B (Pkw) betrachtet. Um die entwickelte Methode der Stoßberechnung auf den Zusammenstoß zweier Pkw anzuwenden, ist bereits im Moment des Erstkontakts beider Objekte eine Weiterentwicklung der Methode notwendig:

- Basierend auf den Einlaufimpulsen beider Objekte wird eine Prognose der PDOF, der Richtung der Stoßkraft, benötigt.

Nachdem das jeweils passende EES-Modell der beiden Pkw identifiziert wurde, kann die dreiphasige Stoßberechnung begonnen werden. Die Phase der plastischen Kollision beginnt mit der Identifizierung der deformierten Voxel. Da in diesem Fall zwei EES-Modelle aufeinandertreffen, ist erneut eine Weiterentwicklung der Methode notwendig:

- Basierend auf den Positionen sich überdeckender Voxel und deren EES-Werten müssen die deformierten Voxel beider EES-Modelle gemeinsam bestimmt werden.
- Durch die Verwendung zweier beweglicher und deformierbarer Objekte kann es zu Teilüberdeckungen und verschiedenen Kollisionskonstellationen kommen. So wird beispielsweise bei einer seitlichen Kollision eines Pkw bei einem realen Crash mehr deformiert als nur der Bereich, in den das stoßende Fahrzeug eindringt. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine Vorschrift zur Deformation umliegender Voxel zu entwickeln.

Anhand der deformierten Voxel kann nun analog zur bisher entwickelten Methode der Vektor der Stoßkraft berechnet werden. Die Stoßkraft wirkt auf beide Objekte, jeweils in entgegengesetzter Richtung, und verursacht bei beiden resultierende Beschleunigungen und damit Änderungen des Bewegungszustands. Mittels kinematischer Zusammenhänge werden beide Objekte neu positioniert. Anschließend beginnt die nächste Iteration der Berechnung, bis die Phase der plastischen Kompression beendet ist. Da der Stoßantrieb einer Kollision für den gesamten Stoß gilt und nicht objektabhängig ist, gelten die entwickelten Abbruchbedingungen der plastischen Kompression weiterhin. Nach Abbruch von Phase I werden die Phasen der elastischen Kompression und elastischen Restitution durchlaufen. Nach Phase III lösen sich beide Objekte voneinander und der Stoß ist beendet.

Im Folgenden werden die eingeführten Weiterentwicklungen der Methode erläutert.

### 2.2.5.1 Auswahl der EES-Modelle

Analog zur bisher entwickelten Methode muss im Moment des Erstkontakts prognostiziert werden, in welche Richtung die Stoßkraft wirken wird (PDOF). Da beide stoßenden Objekte beweglich sind und damit einen Impuls größer null besitzen können, müssen beide Impulse im Moment des Erstkontakts berücksichtigt werden. In diesem Projekt wird mittels Subtraktion der Einlaufimpulse die Richtung der Stoßkraft prognostiziert. Auf Grundlage der Kollisionsgeschwindigkeiten beider Objekte wird der relative Einlaufimpuls  $\Delta p_k$  bestimmt:

$$\Delta \underline{p}_k = \underline{p}_{k1} - \underline{p}_{k2} = m_1 * \underline{v}_{k1} - m_2 * \underline{v}_{k2} \quad \text{Gleichung 9: relativer Einlaufimpuls}$$

Der relative Einlaufimpuls wird im Folgenden in die lokalen Objekt-Koordinatensysteme transformiert, wodurch der Winkel von  $\Delta \underline{p}_k$  relativ zum Objekt bestimmt werden kann. Dieser Winkel dient als Grundlage zur Berechnung der PDOF. Nach erfolgreicher Berechnung liegt für jedes Objekt die PDOF vor, wodurch das zur aktuellen Stoßkonstellation passende EES-Modell für jedes Objekt geladen wird. Abbildung 2-22 zeigt die Berechnung der PDOF anhand verschiedener Beispiele.

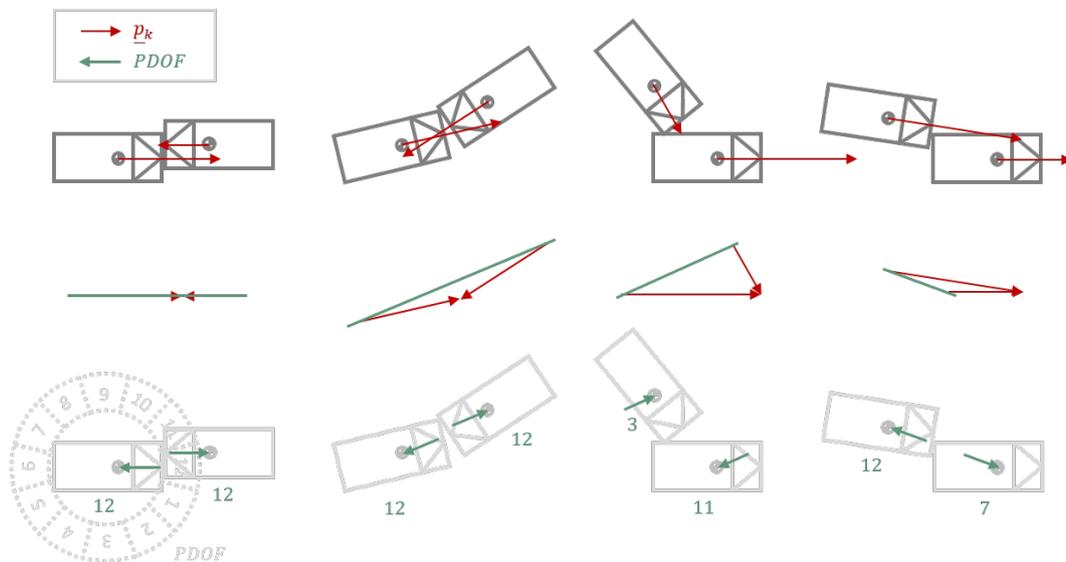


Abbildung 2-19: Berechnung der PDOF aus dem relativen Einlaufimpuls

### 2.2.5.2 Identifikation der deformierten Voxel

Durchführung

Bisher wurden alle Voxel deformiert, die in ein starres, nicht deformierbares Objekt eingedrungen sind. Da bei Pkw-Pkw-Kollisionen zwei deformierbare EES-Modelle miteinander kollidieren, muss das zu deformierende Voxel aus den zwei sich überlappenden Voxeln ausgewählt werden.

Zu Beginn einer Iteration der plastischen Kompressionsphase wird geprüft, welche Voxel des ersten Objektes durch Voxel des zweiten Objektes überdeckt werden. Dabei ist definiert, dass sich zwei Voxel überdecken, sobald ihre Mittelpunkte weniger als eine halbe Voxel-Dimension voneinander entfernt sind. Anschließend werden die EES-Werte der sich überdeckenden Voxel miteinander verglichen. Das Voxel mit dem kleineren EES-Wert ist das „weichere“ und wird daher deformiert, während das „steifere“ Voxel bestehen bleibt. Der EES-Wert des „steiferen“ Voxels wird um den Betrag des „weicheren“ Voxels abgeschwächt. So wird sichergestellt, dass ein weicherer Fahrzeug stärker deformiert wird als ein steiferes Fahrzeug.

Es kann vorkommen, dass die sich überdeckenden Voxel identische EES-Werte enthalten. In diesem Fall wird das erste Objekt bevorzugt und das gegnerische Objekt deformiert. Kommt es zu einem späteren Zeitpunkt innerhalb derselben Kollision erneut zu identischen EES-Werten, so wird dann das gegnerische Objekt bevorzugt. Dieses Vorgehen ist analog zum Master-Slave-Verfahren, welches in Kapitel 2.1.3 vorgestellt wurde.

### 2.2.5.3 Deformation umliegender Voxel

Bei realen Kollisionen werden nicht nur die Bereiche des direkten Kontakts deformiert, sondern auch umliegende Bereiche. Dies ist anhand des Crashtests in Abbildung 2-23 zu erkennen.

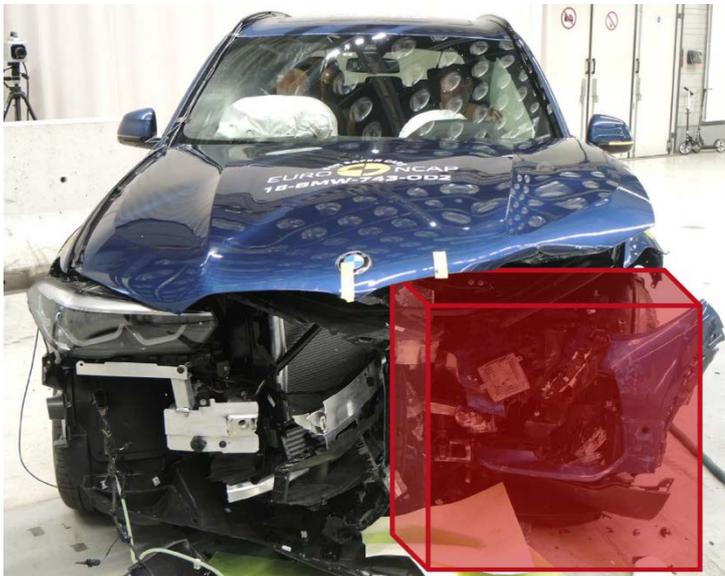


Abbildung 2-20: Deformation umliegender Bereiche

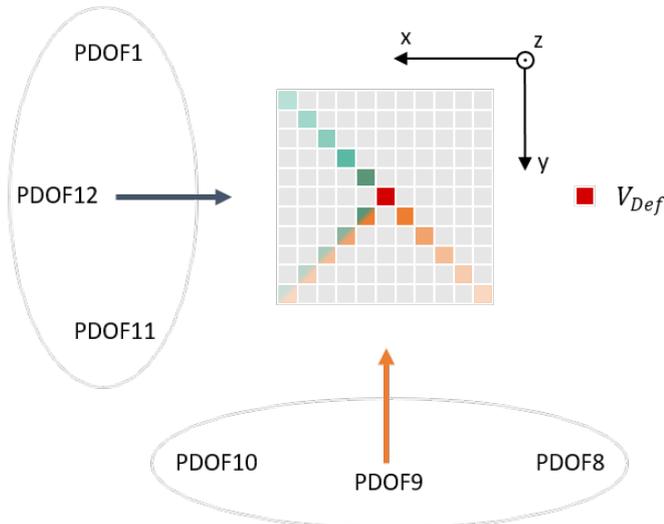
[Quelle: EuroNCAP]

Das rote Volumen symbolisiert die in das Fahrzeug eingedrungene Barriere. Die umliegenden Bereiche sind in Abhängigkeit ihrer Steifigkeit deformiert. Der Querträger und die rechte Scheinwerferrückwand sind deformiert, während der rechte Längsträger (hinter dem weißen Rechteck) im Vergleich zu umliegenden Teilen hervorsteht.

Daraus folgt, dass bei der Deformation der EES-Modelle auch umliegende Bereiche unter Beachtung ihres Energieinhaltes einbezogen werden müssen.

Um den Energieinhalt der umliegenden deformierten Bereiche in der Berechnung zu berücksichtigen, werden die zusätzlich deformierten Voxel bereits während einer Iteration der plastischen Kompression bestimmt. Dazu werden für jedes überdeckte und deformierte Voxel nach einer Vorschrift alle umliegenden Voxel deformiert. Diese Vorschrift ist in Abbildung 2-24 für ein zweidimensionales EES-Modell visualisiert.

Durchführung



**Abbildung 2-21:**  
schematische Darstellung  
der Deformation  
umliegender Voxel

Die Abbildung zeigt ein schematisch dargestelltes EES-Modell in Grau, bei welchem das tatsächlich deformierte Voxel  $V_{Def}$  rot dargestellt wird. In Abhängigkeit der PDOF wird entschieden, in welche Richtung der sogenannte Deformationskegel aufgebaut wird. Der Deformationskegel entsteht durch schrittweise Verbreiterung der deformierten Fläche in Richtung des Randes des EES-Modells. Dabei werden jeweils drei PDOF zu einer Richtung gruppiert. Der Deformationskegel in y-Richtung (PDOF 8, 9, 10) wird in Orange dargestellt, während der Deformationskegel in x-Richtung (PDOF 11, 12, 1) in Grün abgebildet ist. Die Nähe zur Außenkontur wird in der Abbildung durch zunehmende Transparenz verdeutlicht.

Um sicherzustellen, dass steifere Bereiche beim Aufbau des Deformationskegels bestehen bleiben, werden die EES-Werte der zusätzlich deformierten Voxel  $V_Z$  mit dem EES-Wert des tatsächlich deformierten Voxel  $V_{Def}$  verglichen. Diese Bedingung ist angelehnt an die mechanische Belastung bei Zug eines Werkstoffs. Zieht eine Kraft an einem Bauteil, so ist die verursachte Zugspannung überall im Bauteil gleich. Ist der EES-Wert von  $V_Z$  größer als der von  $V_{Def}$ , so darf das zusätzlich deformierte Voxel  $V_Z$  nicht deformiert werden.

#### 2.2.5.4 Zwischenfazit

-----  
Durchführung  
-----

Die bisher entwickelte Stoßberechnungsmethode wurde auf die Kollision zweier EES-Modelle eines Pkw übertragen. Durch den einfachen Aufbau und Ablauf der entwickelten Methode konnten große Teile übernommen und auf eine Pkw-Pkw-Kollision angewendet werden. Zusätzlich wurden folgende Teilbereiche weiterentwickelt:

- Die PDOF, die Richtung der Stoßkraft, wird auf Grundlage der Einlaufimpulse beider Pkw prognostiziert.
- Unter Verwendung der jeweiligen EES-Werte wird bei Überlappung zweier Voxel das zu deformierende Voxel identifiziert.
- Aufgrund der Verwendung zweier deformierbarer Objekte wurde eine Vorschrift zur Deformation umliegender Voxel entwickelt. Analog zu einem realen Crash werden nicht nur die Bereiche im direkten Eingriff beider Stoßpartner deformiert, sondern auch umliegende Bereiche berücksichtigt.

Aufgrund der beschriebenen Weiterentwicklungen ist die Stoßberechnungsmethode in der Lage, den Zusammenstoß zweier EES-Modelle eines Pkw zweidimensional zu berechnen. Damit können Pkw-Pkw-Kollisionen nachgestellt werden.

## 2.3 AP 3.5 Programmtechnische Umsetzung eines Fzg-Fzg-Crash-Berechnungsmodells

Durchführung

### 2.3.1 Implementierung der Stoßberechnungsmethode

Um die hier entwickelte Stoßberechnungsmethode anzuwenden und zu validieren, wurde diese unter Verwendung von Qt 5.14.1 in C++ implementiert. Zusätzlich zum eigentlichen Berechnungskern wurde eine grafische Benutzeroberfläche für Eingaben, visuelle Darstellung und Ausgabe der Deformationen programmiert. Dieses Programm wird fortan **impactEES** (*iEES*) genannt. *iEES* ist in der Lage, beliebig viele Objekte vom Typ Mauer (starr, nicht deformierbar) und vom Typ Pkw (beweglich, deformierbar) zu erstellen und zu positionieren. Jeder Objekttyp besitzt dabei unterschiedliche Eingabeparameter. Beispielsweise kann nur einem Pkw ein EES-Modell nach Erbsmehl sowie eine Trajektorie zugewiesen werden, einer Mauer dagegen nicht. Basierend auf den Stützpunkten der Trajektorie wird diese durch parametrische Polynome dritten Grades C2-stetig interpoliert. Abbildung 2-25 zeigt die Benutzeroberfläche von *iEES*. Über den Eingabebereich am linken Bildschirmrand können die beteiligten Objekte

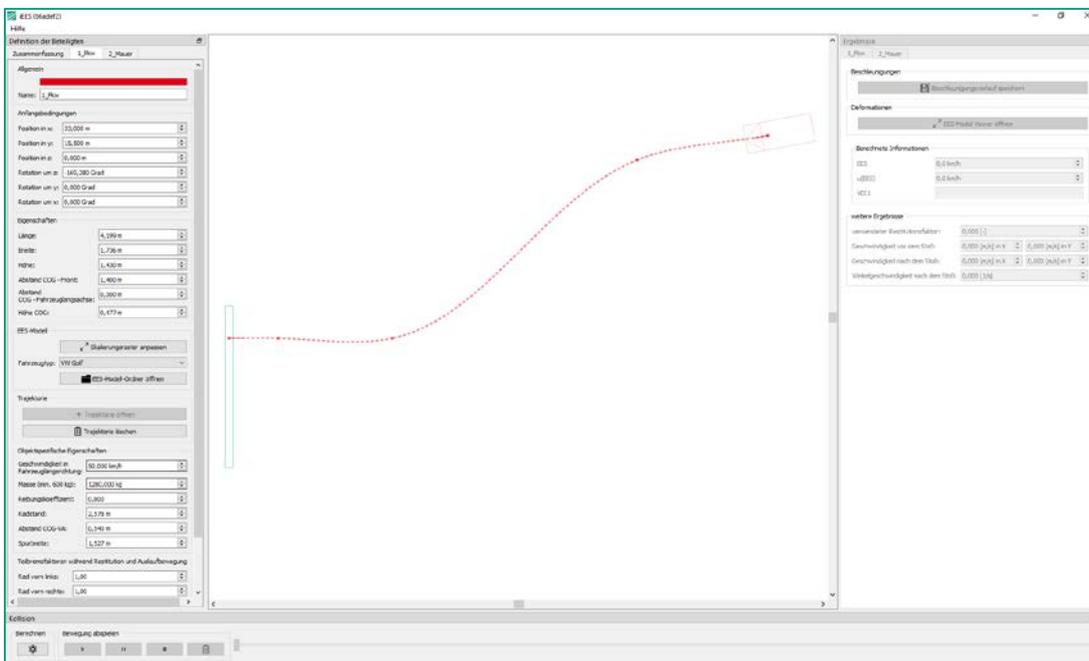


Abbildung 2-22: Benutzeroberfläche des entwickelten Kollisionsberechnungsprogramms *iEES*

definiert werden. Anschließend kann über den „Berechnen“-Knopf links unten die Kollisionsüberwachung gestartet werden.

Zuerst werden beide Objekte, sofern sie beweglich sind, entlang ihrer Trajektorie bewegt (Einlaufsimulation). Dazu werden die vom Nutzer eingegebenen Initialgeschwindigkeiten verwendet. In diesem Projekt ist eine rein kinematische Verfolgung der Trajektorie umgesetzt. In Zeitabständen von  $\Delta t = 1 \text{ ms}$  werden Position und Winkel der Objekte auf ihre jeweilige Trajektorie angepasst. Während der Kollisionsüberwachung prüft *iEES*, ob es zu einem Kontakt zwischen den ersten beiden definierten Objekten kommt. Ist dies der Fall, wird ab diesem Zeitpunkt des Erstkontaktes in die Phase der plastischen Deformation übergeben. Andernfalls endet die Simulation, wenn alle Objekte das Ende ihrer Trajektorie erreicht haben. Wird eine Kollision detektiert, so wird diese zeitlich aufgelöst nach der in diesem Projekt entwickelten Methode berechnet.

Nachdem auch die Phase der elastischen Restitution durchlaufen wurde, lösen sich die Objekte wieder voneinander. *iEES* ist in der Lage, die Bewegung der Objekte bis in ihre Endlagen zu simulieren (Auslaufsimulation). Dabei wird die kinetische Energie nach

dem Stoß durch die Reibung zwischen Reifen und Boden umgewandelt.  
Sekundärkollisionen werden nicht berücksichtigt.

Sowohl die Einlauf- als auch die Auslaufsimulation sind nicht Fokus dieses Projekts und dienen nur der Visualisierung der Simulation sowie der frühzeitigen Identifikation von Fehlerquellen.

Aus dem Zwischenfazit in Kapitel 2.2.2.3 wurde die zweidimensionale Umsetzung der entwickelten Stoßberechnungsmethode abgeleitet. Da jedoch die vorliegenden EES-Modelle dreidimensional aufgebaut sind, werden diese vor Beginn der Stoßberechnung in die x-y-Ebene (Straßen-Ebene) des Fahrzeuges projiziert. Dazu werden unter anderem die EES-Werte aller vertikal übereinanderliegenden Voxel addiert.

Anschließend kann der Stoß zweidimensional berechnet werden. Nach erfolgreicher Berechnung werden die deformierten Bereiche der zweidimensionalen EES-Modell-Projektion zurück auf das dreidimensionale EES-Modell projiziert. Das ermöglicht die dreidimensionale Visualisierung des deformierten Fahrzeuges.

---

Durchführung

---

Um in *iEES* beliebige Pkw zu simulieren, hält das EES-Modell bereits sechs verschiedene Basis-Karosserieformen bereit. Zusätzlich können Unterschiede in den Fahrzeugmaßen und Proportionen berücksichtigt werden, da *iEES* eine Skalierungsfunktion beinhaltet. Mit Hilfe des Skalierungsrasters kann jeder beliebige Pkw simuliert werden. Das Editierfenster des Skalierungsrasters wird in Abbildung 2-26 gezeigt. Das Skalierungsraster kann durch den Nutzer unter Angabe der Fahrzeugmaße Länge, Breite und Höhe und unter Verwendung einer beliebigen Seitenansicht des Ziel-Pkw (Bilddatei) erstellt werden.

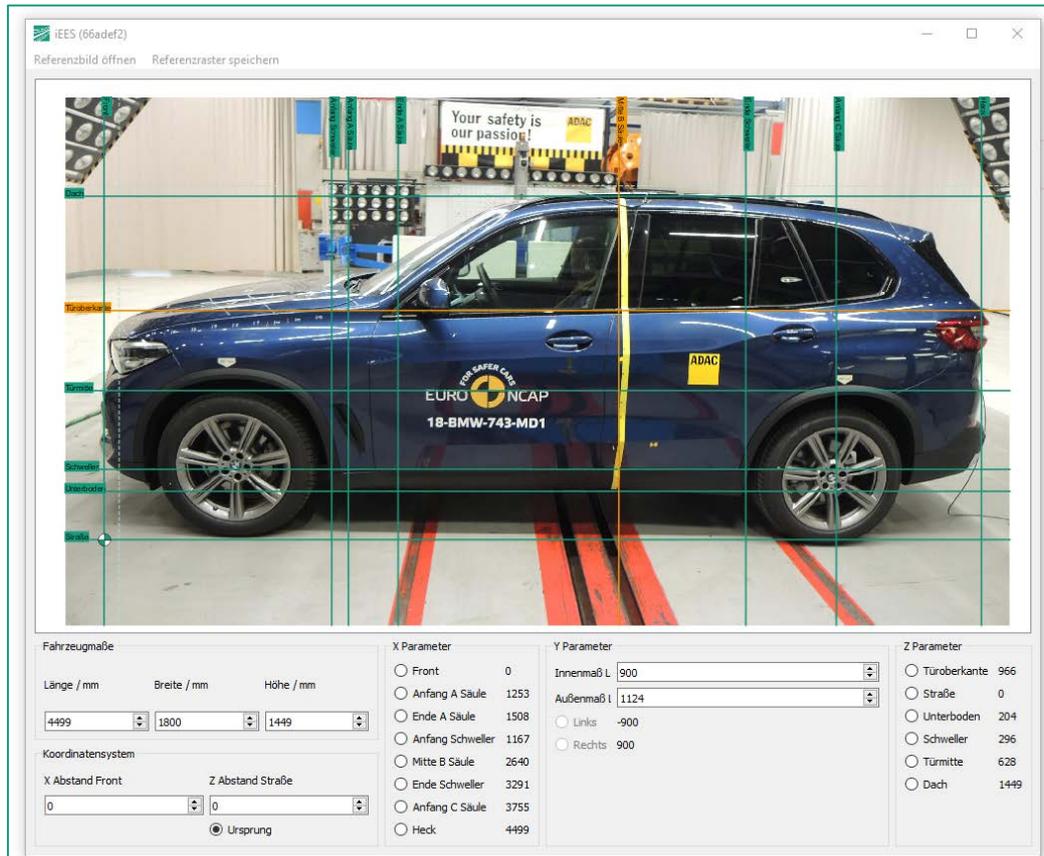


Abbildung 2-23:  
Editierfenster des  
Skalierungsrasters in *iEES*  
[Quelle EuroNCAP]

### 2.3.2 Berechnung einer EES über den gesamten Stoßvorgang

Nach Abschluss der gesamten Bewegungssimulation aus Einlauf-, Stoß- und Auslaufsimulation können die Ergebnisse aufbereitet und im Ausgabebereich am rechten Bildschirmrand (Abbildung 2-25) zur Verfügung gestellt werden. Da das Energy Equivalent Speed (EES)-Modell eines Pkw während der Stoßsimulation deformiert wird, können diese Deformationen dreidimensional in einem Anzeigefenster dargestellt werden. Auf der Grundlage aller nach dem Stoß deformierten Voxel kann ein gesamter EES-Wert durch Addition der einzelnen Voxel-EES-Werte berechnet werden. Dieser wird gemeinsam mit einer vom EES-Modell berechneten Unsicherheit ausgegeben. Diese basiert auf der Streuung aller Energiewerte eines Voxels bei der Modellerstellung und wird pro Voxel im Modell abgelegt. Zusätzlich kann der Nutzer eine \*.csv-Datei mit den berechneten Beschleunigungsverläufen abspeichern. Dabei wird der Beginn der Kollision mit  $t = 0 \text{ ms}$  definiert. Zusätzlich werden die Geschwindigkeiten beider Stoßpartner vor und nach dem Stoß ausgegeben.

### 2.3.3 Zwischenfazit

-----  
Durchführung  
-----

Durch die Implementierung des Berechnungskerns und die Programmierung einer grafischen Nutzeroberfläche in C++ kann die entwickelte Stoßberechnungsmethode angewendet werden. Durch verschiedene Eingabemöglichkeiten können die initialen Bedingungen definiert und beliebige Pkw mit Hilfe eines Skalierungsrasters simuliert werden. Zur Visualisierung der Simulation und ihrer Ergebnisse wurden eine einfache Einlauf- und Auslaufsimulation sowie folgende Ausgabefunktionen für Ergebnisse je Stoßpartner implementiert:

- Angabe der EES und der PDOF (Principal Direction of Force)
- Geschwindigkeiten und Winkelgeschwindigkeiten vor und nach dem Stoß
- Anzeige der Deformationen in einer dreidimensionalen Ansicht
- Speicherung der Beschleunigungsverläufe (Beginn der Kollision bei  $t = 0$ )

## 2.4 AP 3.6 Validierung – Vergleich des Berechnungsansatzes mit realen Crashtests

Um die Validierung der entwickelten Methode zu unterstützen, stellte das ADAC Technikzentrum Landsberg verschiedene Crashtests zur Verfügung. Dazu gehörten sowohl Pkw-Wand- und Pkw-Pfahl-Crashtests als auch Pkw-Pkw-Crashtests. Auch Volkswagen stellte einige Pkw-Wand-Crashtests zur Verfügung. In einem aufwändigen Verfahren wurden alle simulierbaren Crashtests aufbereitet. Der Aufbereitungsprozess umfasste für jeden Crashtest:

- das Sichten der Crashtest-Daten (Sind die Messkanäle brauchbar? Sind alle erforderlichen Daten bekannt?)
- die Berechnung relevanter Parameter zum Vergleich mit der Simulation:
  - o Severity Index
  - o mittlere Beschleunigung des Fahrzeuges
  - o maximale Beschleunigung des Fahrzeuges
  - o EES des Fahrzeuges
  - o kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ( $\Delta v$ , oder  $\Delta v$ )
- die Vorbereitung von Simulationsdateien für *impactEES*, um den Crashtest zu simulieren (Beteiligendefinition sowie Trajektorienherstellung)
- die Simulation in *impactEES*
- die automatisierte Auswertung der Simulationsergebnisse und Berechnung der relevanten Parameter (siehe Aufzählung oben)
- Gegenüberstellung und Auswertung der Parameter aus Crashtest und Simulation in Grafiken

Durch das Rückspielen der Erkenntnisse und das mehrfache Durchlaufen aller Schritte konnten die folgenden Randbedingungen der Methode abgeleitet werden:

- Bei Severity Index, mittlerer und maximaler Beschleunigung treten teilweise große Abweichungen auf. Diese sind vor allem auf die bislang nur zweidimensionale Berechnung sowie die nur bedingt umgesetzte indirekte Deformation (siehe Kapitel 2.2.5.3) zurückzuführen. Besonders bei Pfahl-Kollisionen haben die indirekten Deformationen großen Einfluss auf die Ergebnisse.
- Die seitliche Modellgüte nimmt ebenfalls Einfluss auf das Ergebnis. Die Berechnungen mit dem EES-Modell BASIC (enthält alle Unfalldaten in Form eines Kompaktwagens) erzielen bessere Ergebnisse als die Berechnungen mit dem EES-Modell compact (Unfalldaten der Kompaktklasse). Das zeigt, dass eine steigende Anzahl von Unfalldaten und Crashtest-Daten auch zukünftig für die Erhöhung der Ergebnisqualität von Bedeutung ist.
- Bei schrägen Block-Kollisionen fehlt die Reibung in der Kollisionssimulation. Zukünftig sollte auch die Kontaktreibung zwischen kollidierenden Objekten berücksichtigt werden.
- Die EES und die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung werden von *impactEES* mit geringen Abweichungen berechnet. Hier rufen lediglich Pkw-Pkw-Kollisionen mit stark unterschiedlichen Massen größere Abweichungen hervor. Dies kann auf die derzeit noch unzureichend skalierten EES-Modelle zurückzuführen sein. Zukünftig steigt die Datenbasis, wodurch beispielsweise die Trennung zwischen Kleinstwagen und SUV an Schärfe zunimmt und sich damit die Simulationsergebnisse verbessern.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen Crashtest und Simulation sowie den normierten Fehler für die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung und die EES.

-----  
 Durchführung  
 -----

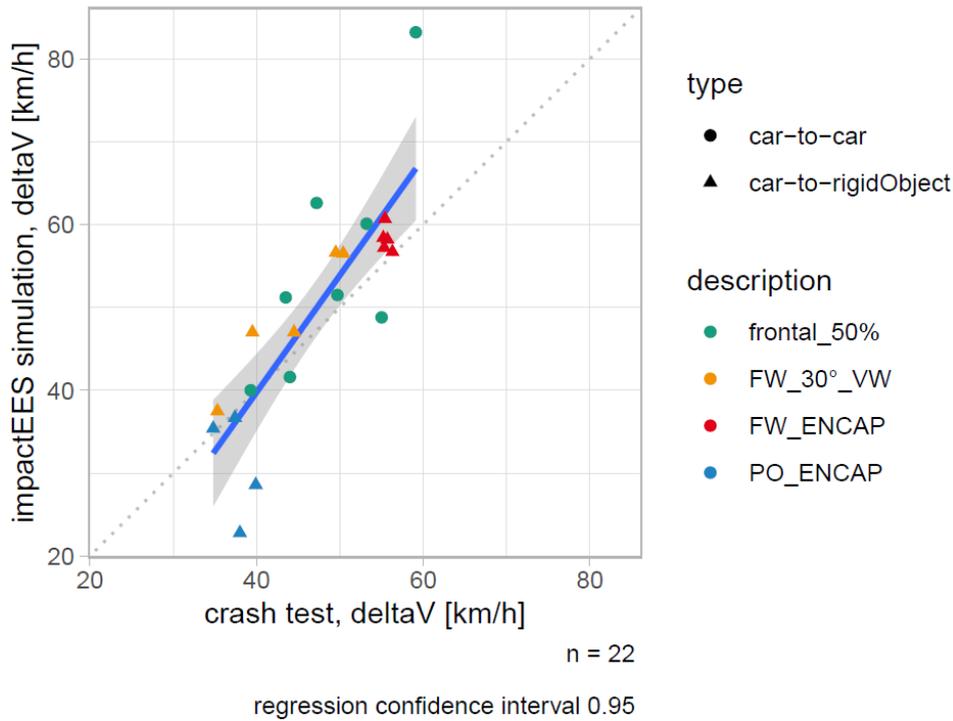


Abbildung 2-24: Vergleich der aus der Simulation berechneten kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung (deltaV) mit den Messwerten der Crashtests

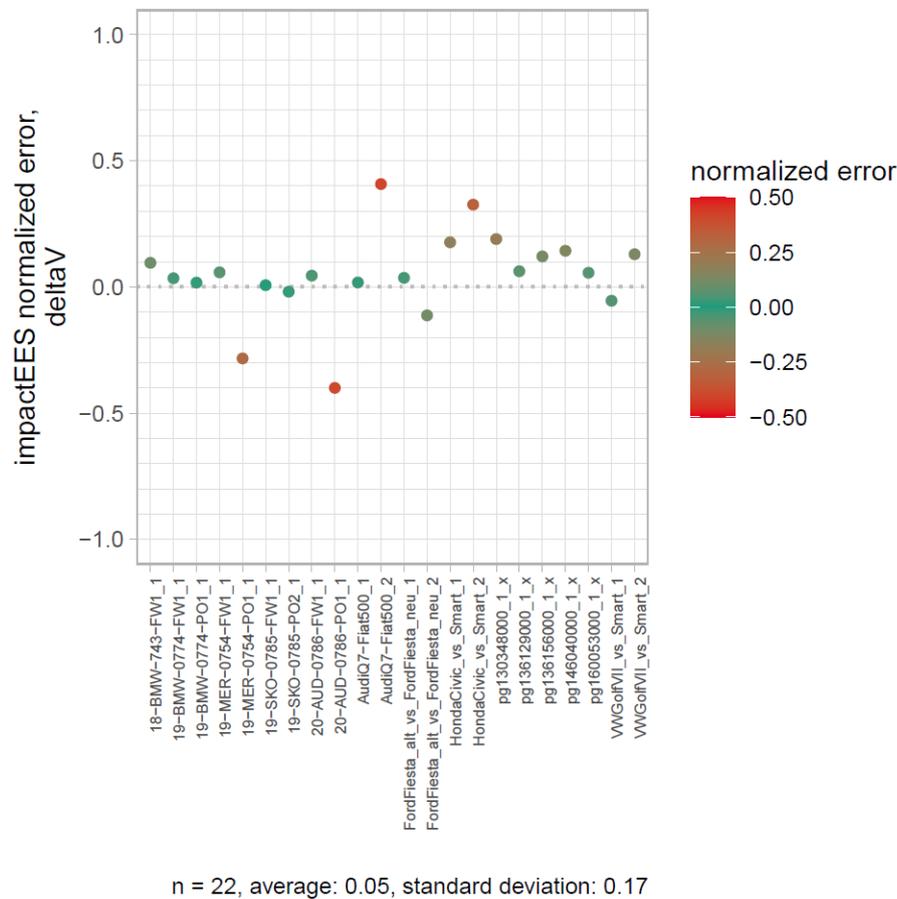


Abbildung 2-25: Normierter Fehler der aus der Simulation berechneten kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung (deltaV)

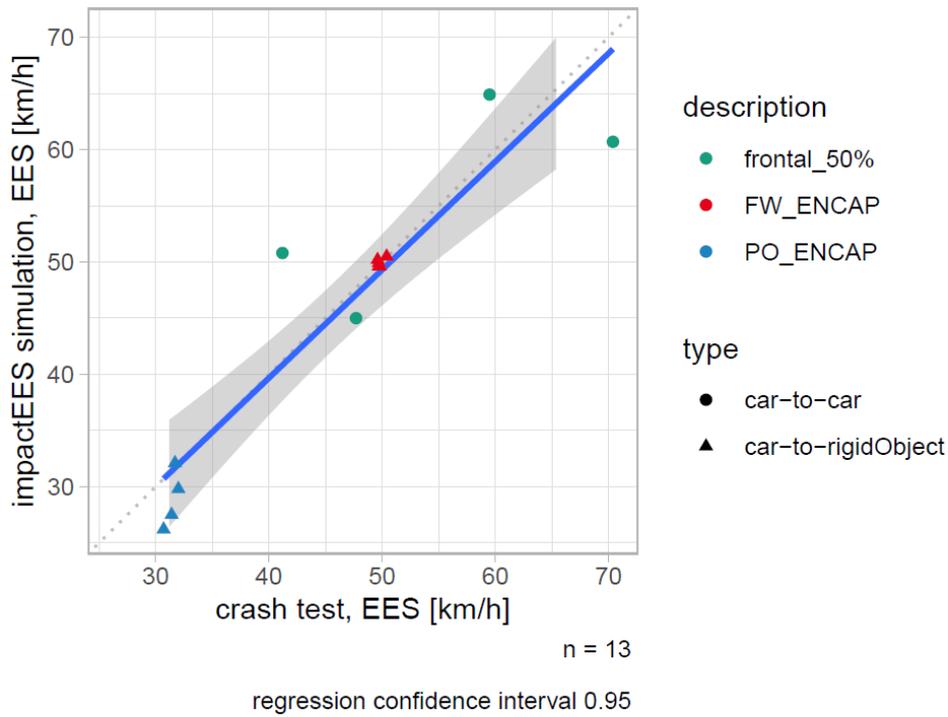


Abbildung 2-26: Vergleich der aus der Simulation berechneten EES-Werte mit den Messwerten der Crashtests

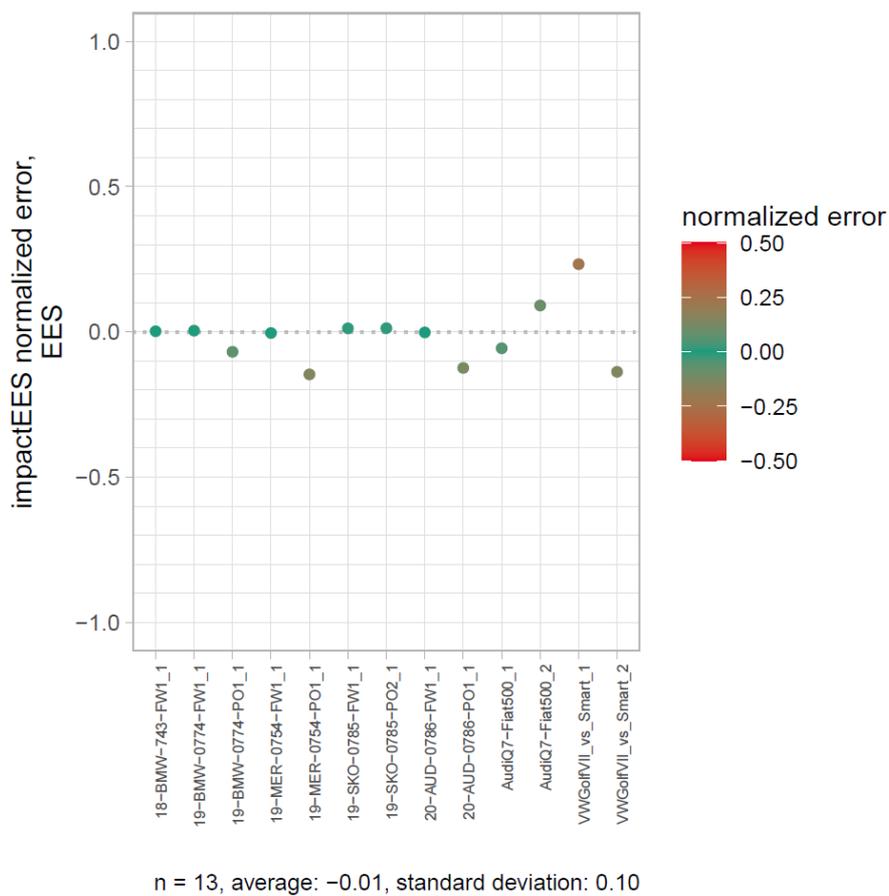


Abbildung 2-27: Normierter Fehler der aus der Simulation berechneten EES-Werte

## 2.5 AP 3.n Berechnung von Verletzungsrisikofunktionen zur Verletzungsschwereprognose

In Zusammenarbeit mit der Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (VUFO) wurden nach der von Spitzhüttl et. al., 2016 veröffentlichten Methode Verletzungsrisikofunktionen (VRF) berechnet. Um eine möglichst vielseitige Anwendung zu gewährleisten, wurden verschiedene Funktionen berechnet, welche jeweils unterschiedliche Kollisionsschwereparameter und zusätzliche Parameter verwenden. Die im Folgenden vorgestellten Verletzungsrisikofunktionen können genutzt werden, um aus den Ergebnissen aus *impactEES* Verletzungsrisiken für das Fahrzeug oder sogar einzelne Insassen abzuleiten.

Die Verletzungsrisikofunktionen basieren auf GIDAS-Daten mit den folgenden Eigenschaften:

- mindestens ein Insasse ist verletzt
- ausschließlich Pkw und Insassen von Pkw werden berücksichtigt
- die GIDAS-Variablen MAIS15 and PVERL1 sind bekannt
- die GIDAS-Variable STATUS ist gleich 4 (komplett und rekonstruiert)
- keine Mehrfachkollisionen, kein Überschlag, kein Unterfahren
- Modelljahr der Pkw ab 2001
- alle Parameter der Verletzungsrisikofunktionen sind bekannt

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien sind 9.678 Datensätze auf Insassenebene und 7.132 Datensätze auf Beteiligtebene zur Erstellung der Verletzungsrisikofunktionen verfügbar. Die folgenden Basis-VRF auf Insassenebene liegen vor:

- $A0 = f(EES, \Delta v, Impact \text{ [siehe unten], Fahrzeugtyp})$
- $B0 = f(EES, Impact, Fahrzeugtyp)$
- $C0 = f(\Delta v, Impact, Fahrzeugtyp)$

Basierend auf den gezeigten Basis-VRF liegen die folgenden erweiterten Funktionen auf Insassenebene vor:

- $X1 = \text{Basis} + f(\text{Gurtnutzung, Airbag\_ausgelöst, Alter, Geschlecht})$
- $X2 = \text{Basis} + f(\text{Modelljahr, Leermasse})$
- $X3 = \text{Basis} + f(\text{Gurtnutzung, Airbag\_ausgelöst, Alter, Geschlecht, Modelljahr, Leermasse})$

Auf Beteiligtebene existiert die folgende Verletzungsrisikofunktion:

- $D0 = f(EES, \Delta v, Impact\text{-Beteiligter [siehe unten], Fahrzeugtyp, Modelljahr, Leergewicht})$

Jede Verletzungsrisikofunktion liegt für die Verletzungsschwere-Parameter MAIS 2+, PVERL<sup>1</sup> 4+ (schwer verletzt, stationär behandelt) und PVERL 3+ (leicht verletzt, ambulant behandelt) vor.

**Achtung:** Die Verletzungsrisikofunktionen für PVERL3+ sollten unter Beachtung des folgenden Sachverhaltes genutzt werden: GIDAS enthält keine Verkehrsunfälle, bei denen keine Person verletzt wurde. Daher kann die Klasse der unverletzten Personen (2 – unverletzt) unterrepräsentiert sein.

---

<sup>1</sup> PVERL: 2 – unverletzt, 3 – leicht verletzt (ambulant behandelt), 4 – schwer verletzt (stationär behandelt), 5 – tödlich

Die Variable *Impact* existiert auf Insassen- und auf Beteiligtenebene und charakterisiert die Stoßkonstellation. Auf Insassenebene berücksichtigt die Variable die Sitzposition, die Stoßrichtung (Principal Direction Of Force, PDOF), die Seite des Anstoßes sowie die Deformation der Fahrgastzelle. Auf Beteiligtenebene wird ausschließlich die Stoßrichtung (PDOF), die Seite des Anstoßes und die Deformation der Fahrgastzelle berücksichtigt. Die Variable wird direkt in *impactEES* berechnet.

Nach erfolgreicher Berechnung der Verletzungsrisikofunktionen wurden diese direkt in *impactEES* implementiert, um die Ausgabe von Verletzungsrisiken basierend auf den Berechnungsergebnissen zu ermöglichen.

## 2.6 AP 3.2 Tool zur Nutzung in der PC-Crash-EES-Berechnung

Dieses Arbeitspaket konnte nicht im Rahmen des Projektes abgeschlossen werden. Trotz vieler Absprachen und der vorhandenen gegenseitigen Motivation konnte kein Finanzierungsmodell für die langfristige Integration in PC-Crash entwickelt werden. Da jedoch beidseitig Interesse an einer Kooperation besteht, hat PC-Crash den Vertrieb des Programms *calculateEES* angeboten, wenn die langfristige Finanzierung des Tools geklärt ist. Für Fraunhofer bedeutet dies weitere Bemühungen hinsichtlich der Finanzierung und Freigabe der Daten, um zukünftig mit PC-Crash zusammenzuarbeiten. Diese Bemühungen werden auch über die Projektlaufzeit hinaus andauern.

## 2.7 AP 3.7 Beispielhafte Berechnung einer neuen Crashkonfiguration

Mit Hilfe der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Kollisionsberechnungsmethode ist es möglich, innerhalb kurzer Zeit eine Vielzahl von Kollisionssituationen zu berechnen. Dies ist unter anderem für die Entwicklung neuartiger Crashtests von Bedeutung. Durch Variation können verschiedene denkbare Situationen erzeugt werden, welche anschließend anhand der Verletzungsrisiken verglichen und bewertet werden können. Hierfür wurde die Verletzungsrisikofunktion auf Beteiligtenebene D0 genutzt (siehe Kapitel 2.5).

Im Folgenden werden die variierten Situationen kurz vorgestellt und die Ergebnisse gezeigt.

### 2.7.1 Pkw-Pkw-Kollision, frontal

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Situation und definiert die variierten Variablen. Fahrzeug 1 kollidiert mit 100 km/h mit dem stehenden Fahrzeug 2. Hierbei werden die Überdeckung (overlap) zwischen 20% und 100% in 10%-Schritten sowie der Winkel zwischen  $-45^\circ$  und  $45^\circ$  in  $5^\circ$ -Schritten variiert.

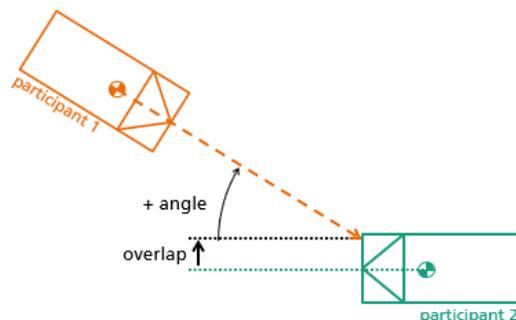
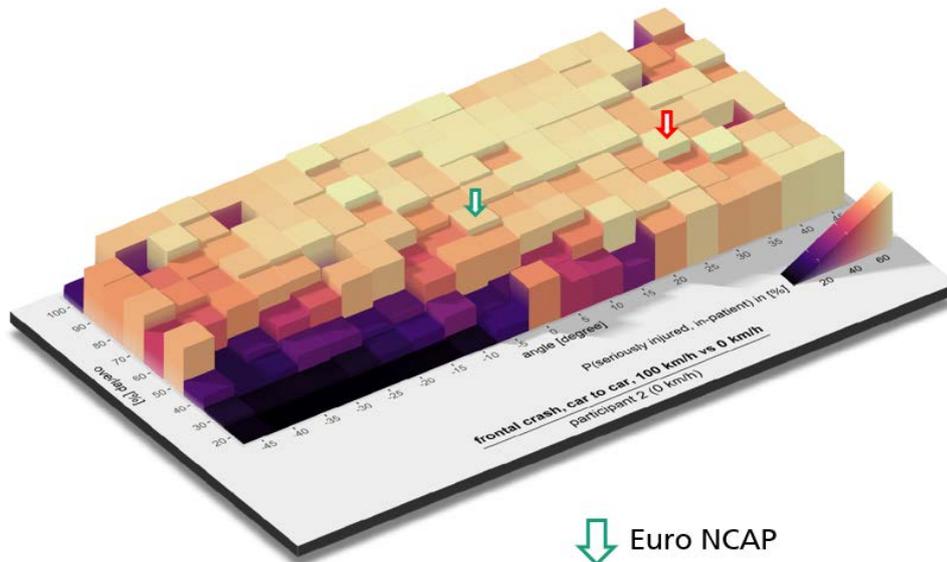


Abbildung 2-28: Skizze der Pkw-Pkw-frontal-Variation

Die Ergebnisse der Simulationen in *impactEES* können in Abbildung 2-32 abgelesen werden. Dabei beschreibt die Höhe der dargestellten Balken die Wahrscheinlichkeit einer schweren Verletzung in Fahrzeug 2.

Abbildung 2-29: Ergebnisse der Pkw-Pkw-frontal-Variation



Der grüne Pfeil markiert den derzeitigen Crashtest in Euro NCAP. Ausgehend von diesem Verletzungsrisiko wurde eine Kollision mit 50% Offset und einem Winkel von 30° zur Fahrzeuglängsachse als kritischer eingestuft und mit einem roten Pfeil hervorgehoben. Diese Situation wird im folgenden Kapitel mit Situation A gekennzeichnet.

### 2.7.2 Pkw-Pkw-Kollision, seitlich

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Situation und definiert die variierten Variablen. Fahrzeug 1 kollidiert mit 60 km/h mit dem stehenden Fahrzeug 2. Hierbei werden der Anstoßpunkt (eccentricity) zwischen 2 Meter hinter dem Schwerpunkt und 0,5 Meter vor dem Schwerpunkt in 0,1 Meter-Schritten sowie der Winkel zwischen -45° und 45° in 5°-Schritten variiert. Aufgrund der Symmetrie der Fahrzeugmodelle ist keine Variation für die rechte Seite des Fahrzeuges nötig.

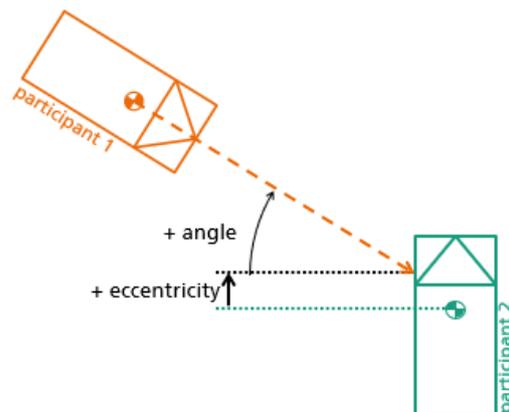
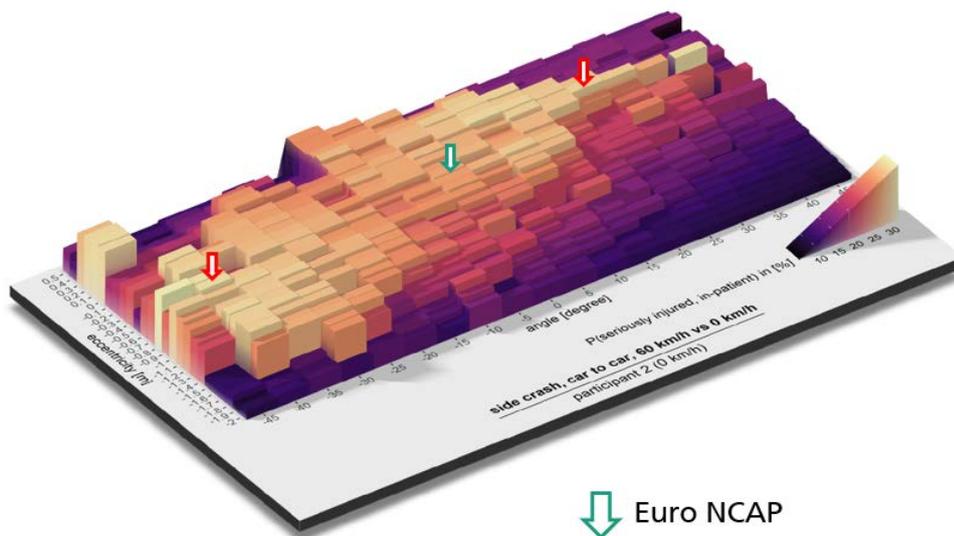


Abbildung 2-30: Skizze der Pkw-Pkw-seitlich-Variation

Die Ergebnisse der Simulationen in *impactEES* können in Abbildung 2-34 abgelesen werden. Dabei beschreibt die Höhe der dargestellten Balken die Wahrscheinlichkeit einer schweren Verletzung in Fahrzeug 2.

Abbildung 2-31: Ergebnisse der Pkw-Pkw-seitlich-Variation



↓ Euro NCAP

Der grüne Pfeil markiert den derzeitigen Crashtest in Euro NCAP. Ausgehend von diesem Verletzungsrisiko wurde eine Kollision 40 cm hinter dem Schwerpunkt mit einem Winkel von 20° zur Fahrzeugquerachse als kritischer eingestuft. Diese Situation wird im folgenden Kapitel mit Situation B gekennzeichnet.

Ebenfalls als kritisch eingestuft wird eine Kollision 90 cm hinter dem Schwerpunkt mit einem Winkel von -40° zur Fahrzeugquerachse (Situation C). Beide Situationen sind mit Hilfe eines roten Pfeils hervorgehoben.

### 2.7.3 Pkw-Pkw-Kollision, Heck

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Situation und definiert die variierten Variablen. Fahrzeug 1 kollidiert mit 80 km/h mit dem stehenden Fahrzeug 2. Hierbei werden die Überdeckung (overlap) zwischen 20% und 100% in 10%-Schritten sowie der Winkel zwischen -45° und 45° in 5°-Schritten variiert.

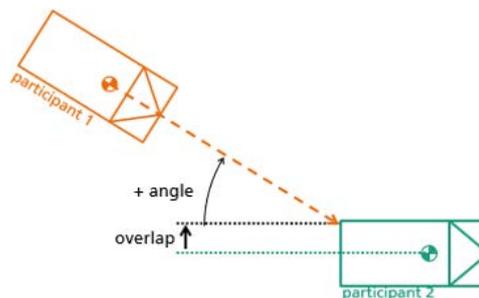


Abbildung 2-32: Skizze der Pkw-Pkw-Heck-Variation

Die Ergebnisse der Simulationen in *impactEES* können in Abbildung 2-36 abgelesen werden. Dabei beschreibt die Höhe der dargestellten Balken die Wahrscheinlichkeit einer schweren Verletzung in Fahrzeug 2.

Abbildung 2-33: Ergebnisse der Pkw-Pkw-Heck-Variation



Für die betrachtete Variation existiert bislang kein Crashtest in Euro NCAP. Im Vergleich aller Pkw-Pkw-Heck-Situationen wurde eine Kollision mit 70% Offset und einem Winkel von 20° zur Fahrzeuglängsachse als kritisch eingestuft und mit einem roten Pfeil hervorgehoben. Diese Situation wird im folgenden Kapitel mit Situation D gekennzeichnet.

### 2.7.4 Pkw-Pfahl-Kollision, frontal

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Situation und definiert die variierten Variablen. Fahrzeug 1 kollidiert mit einem sich mit 40 km/h bewegenden Pfahl. Hierbei werden der Anstoßpunkt (eccentricity) zwischen der Fahrzeugmitte und 0,7 Meter links des Schwerpunktes in 0,1 Meter-Schritten sowie der Winkel mit -30°, -20°, 0°, 20°, 30° variiert. Aufgrund der Symmetrie der Fahrzeugmodelle ist keine Variation für die rechte Seite der Fahrzeugfront nötig. Diese Kollisionssituation kann ohne Weiteres auf die Kollision zwischen einem stehenden Pfahl und einem bewegten Fahrzeug übertragen werden.

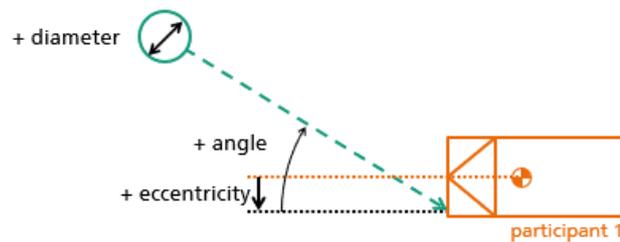
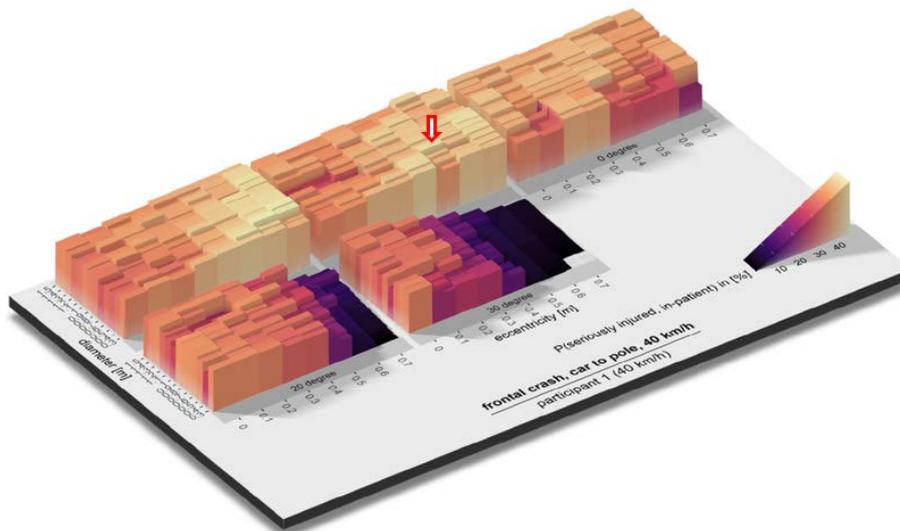


Abbildung 2-34: Skizze der Pkw-Pfahl-frontal-Variation

Die Ergebnisse der Simulationen in *impactEES* können in Abbildung 2-38 abgelesen werden. Dabei beschreibt die Höhe der dargestellten Balken die Wahrscheinlichkeit einer schweren Verletzung in Fahrzeug 2.

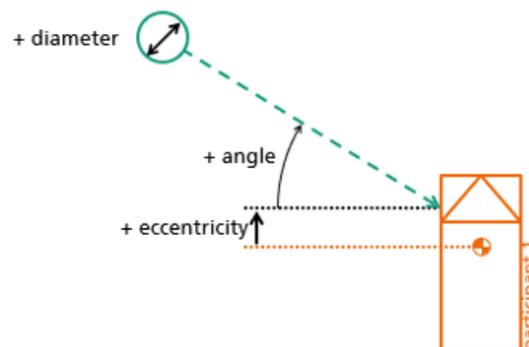


**Abbildung 2-35: Ergebnisse der Pkw-Pfahl-frontal-Variation**

Auch für diese Variation existiert bislang kein Crashtest in Euro NCAP. Durch den Vergleich der Verletzungsrisiken wurde eine Kollision mit einem Pfahl von 60 cm Durchmesser, welcher 50 cm neben der Fahrzeughängsachse mit einem Winkel von  $-20^\circ$  zur Fahrzeughängsachse auftrifft, als kritisch eingestuft und mit einem roten Pfeil hervorgehoben. Diese Situation wird im folgenden Kapitel mit Situation E gekennzeichnet.

### 2.7.5 Pkw-Pfahl-Kollision, seitlich

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Situation und definiert die variierten Variablen. Fahrzeug 1 kollidiert mit einem sich mit 40 km/h bewegenden Pfahl. Hierbei werden der Anstoßpunkt (eccentricity) zwischen 2 m hinter dem Schwerpunkt und 0,5 m vor dem Schwerpunkt in 0,1 m-Schritten sowie der Winkel zwischen  $-45^\circ$  und  $45^\circ$  in  $5^\circ$ -Schritten variiert. Aufgrund der Symmetrie der Fahrzeugmodelle ist keine Variation für die rechte Seite des Fahrzeuges nötig. Diese Kollisionssituation kann ohne Weiteres auf die Kollision zwischen einem stehenden Pfahl und einem bewegten Fahrzeug übertragen werden.



**Abbildung 2-36: Skizze der Pkw-Pfahl-seitlich-Variation**

Aufgrund der bislang begrenzten Fähigkeit des Simulationsprogramms, die indirekten Deformationen neben der direkten Eindringung von Kollisionsobjekten zu berücksichtigen, wurden die Ergebnisse dieser Variation untersucht und bewertet, jedoch nicht zur Entwicklung einer neuen kritischen Situation verwendet. Die Entwicklung einer neuen Deformationsvorschrift wird die Ergebnisqualität seitlicher Pfahlkollisionen verbessern und die Identifikation kritischer Situationen ermöglichen.

## 2.8 AP 3.4 Bewertung der Relevanz neu identifizierter kritischer Crashkonfigurationen

Um die Relevanz der identifizierten Crashkonfigurationen zu bewerten, wurde die VUFO mit einer Unfalldatenanalyse beauftragt. Der dafür erstellte Masterdatensatz enthält Unfälle, welche:

- vollständig erhoben, dokumentiert und rekonstruiert sind,
- zwei beteiligte Pkw (M1/N1-Fahrzeuge) aufweisen,
- die erste Kollision zwischen diesen Beteiligten beinhalten und
- alle erforderlichen Variablen (Überdeckungsgrad, Berührungspunkt, Impulswinkel, PDOF, Länge und Breite des Fahrzeuges) aufweisen.

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien enthält der Masterdatensatz 9.342 Verkehrsunfälle, was 18.684 Fahrzeugen entspricht. Dieser Datensatz bildet die Grundlage für die Einordnung der identifizierten Situationen in das Unfallgeschehen im Großraum Dresden und Großraum Hannover. Eine Hochrechnung auf deutschlandweite Zahlen ist aufgrund der teilweise sehr geringen Fallzahlen nicht erfolgt.

Da die identifizierten Situationen aus einer diskreten Variation heraus (siehe Kapitel 2.7) entstanden, müssen Intervalle für die Kollisionsparameter festgelegt werden. Da die GIDAS-Daten auch Toleranzen unterliegen, werden diese direkt in die Intervalle integriert. Somit werden folgende Intervalle für die Kollisionsparameter festgelegt:

- Impulswinkel/Kollisionswinkel:  $\pm 8^\circ$
- Überdeckungsgrad:  $\pm 8\%$
- Berührungspunkte/Anstoßpunkte für frontale Kollisionen:  $\pm 10\text{ cm}$
- Berührungspunkte/Anstoßpunkte für seitliche Kollisionen:  
 $\pm 3\%$  *der Fahrzeuglänge*

Anhand der vorgestellten Intervalle können die Unfälle des Masterdatensatzes analysiert werden, wodurch sich die Einordnung der identifizierten kritischen Situationen in das Unfallgeschehen wie in den folgenden Kapiteln dokumentiert ergibt.

## 2.8.1 Situation A: Pkw-Pkw-frontal, 50% Offset bei einem Winkel von 30° zur Fahrzeuglängsachse

Durchführung

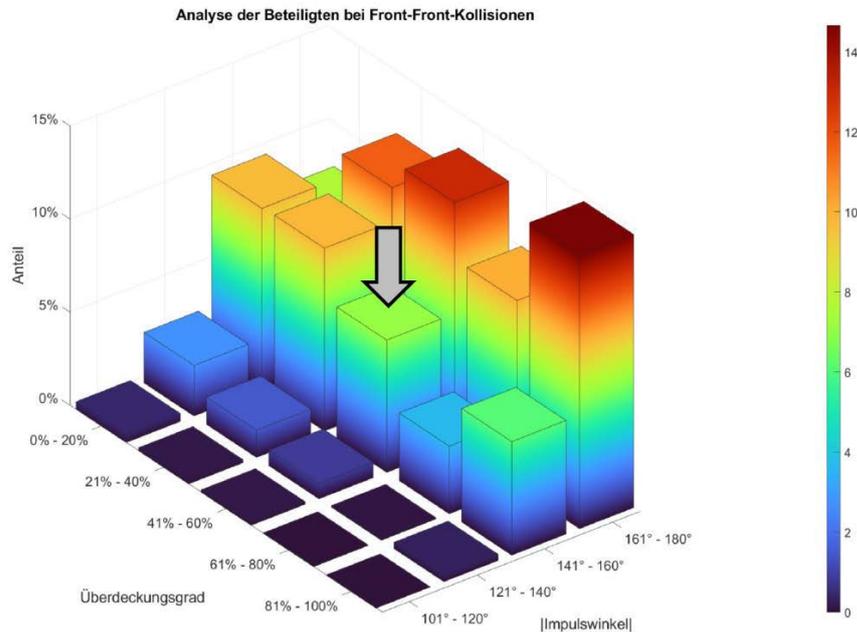
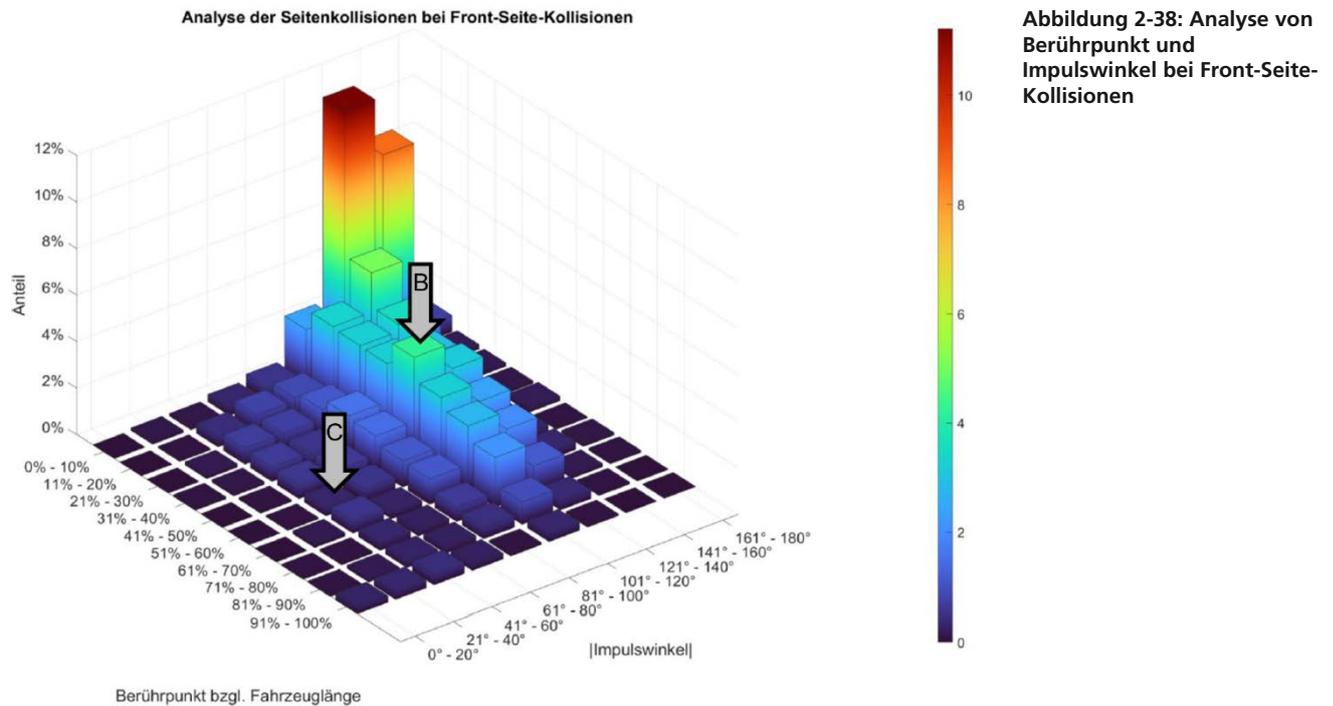


Abbildung 2-37: Analyse von Überdeckungsgrad und Impulswinkel bei Front-Front-Kollisionen

Die obenstehende Abbildung zeigt eine Übersicht der Kollisionsparameter *Überdeckungsgrad* und *Impulswinkel* bei frontalen Kollisionen im Masterdatensatz. Anhand dieser Analyse kann abgeleitet werden, dass die Häufigkeit der Situation A etwa im Mittelfeld des frontalen Unfallgeschehens liegt. Deutlich häufiger sind frontale Kollisionen, bei denen nahezu 180° zwischen beiden Fahrzeugen liegen. In absoluten Zahlen ausgedrückt fallen 98 Unfälle (8,2 % aller Front-Front-Unfälle) in die identifizierten Intervalle, wobei 6 Unfälle davon Verletzungen der Klassifikation MAIS 3 oder schwerer aufwiesen. Situation A ist als kritische und häufige Situation zu berücksichtigen.

## 2.8.2 Situation B: Pkw-Pkw-seitlich, 40 cm hinter dem Schwerpunkt bei einem Winkel von 20° zur Fahrzeugquerachse

Durchführung



Die obenstehende Abbildung zeigt eine Übersicht der Kollisionsparameter *Berührungspunkt* und *Impulswinkel* bei seitlichen Kollisionen im Masterdatensatz. Anhand dieser Analyse kann abgeleitet werden, dass auch die Häufigkeit der Situation B im Mittelfeld des seitlichen Unfallgeschehens liegt. Deutlich häufiger sind Kollisionen an der Ecke eines Fahrzeuges, bei denen zwischen 121° und 160° zwischen beiden Fahrzeugen liegen. Abgesehen von diesen sehr häufigen Unfällen kommt Situation B in Abbildung 2-41 am dritthäufigsten vor.

In absoluten Zahlen ausgedrückt fallen 84 Unfälle (2,4 % aller Front-Seite-Unfälle) in die identifizierten Intervalle, wobei 3 Unfälle davon Verletzungen der Klassifikation MAIS 3 oder schwerer aufwiesen.

Situation B ist als kritische und häufige Situation zu berücksichtigen.

## 2.8.3 Situation C: Pkw-Pkw-seitlich, 90 cm hinter dem Schwerpunkt bei einem Winkel von -40° zur Fahrzeugquerachse

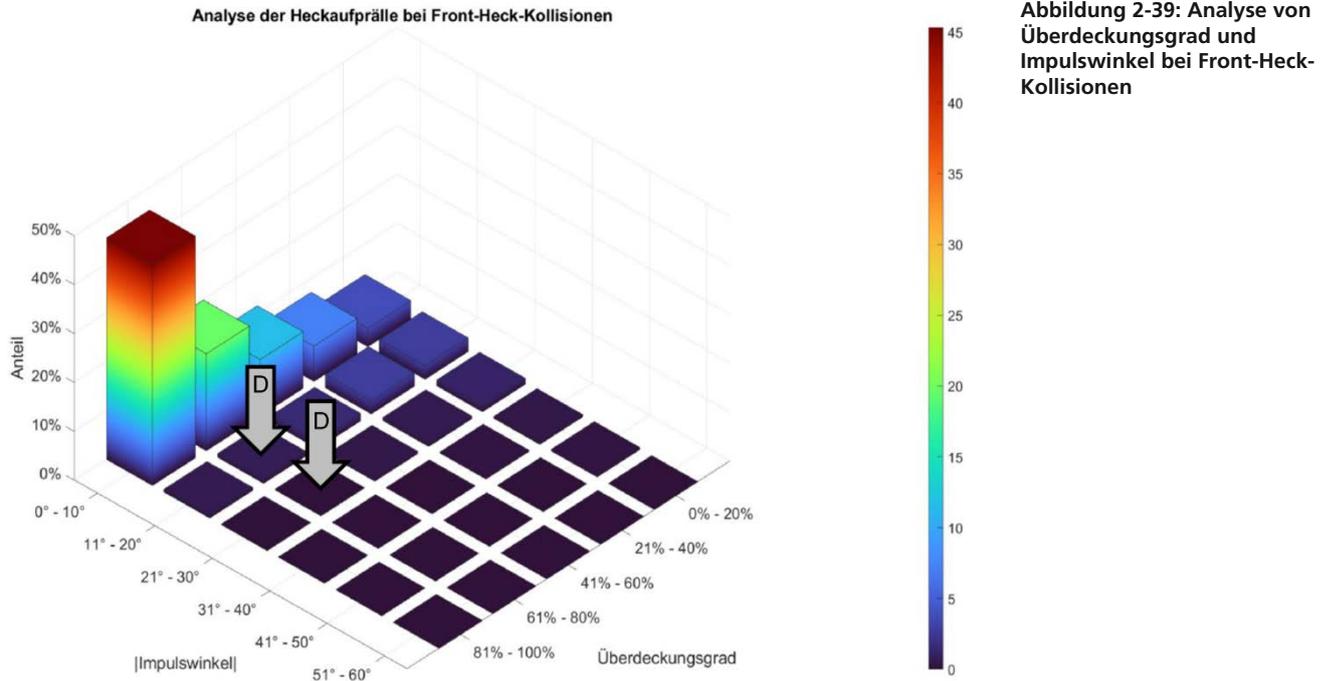
Situation C ist in Abbildung 2-41 enthalten, wodurch abgeleitet werden kann, dass diese sehr selten im Unfallgeschehen vorkommt.

In absoluten Zahlen ausgedrückt fallen 4 Unfälle (0,1 % aller Front-Seite-Unfälle) in die identifizierten Intervalle, wobei keine Unfälle mit Verletzungen der Klassifikation MAIS 3 oder schwerer auftraten.

Situation C ist als kritische, aber sehr seltene Situation zu dokumentieren.

## 2.8.4 Situation D: Pkw-Pkw-frontal, 70% Offset bei einem Winkel von 20° zur Fahrzeuglängsachse

Durchführung



**Abbildung 2-39: Analyse von Überdeckungsgrad und Impulswinkel bei Front-Heck-Kollisionen**

Die obenstehende Abbildung zeigt eine Übersicht der Kollisionsparameter *Überdeckungsgrad* und *Impulswinkel* bei Front-Heck-Kollisionen im Masterdatensatz. Die Analyse zeigt, dass Situation D ebenfalls kaum im realen Unfallgeschehen vorkommt. Deutlich häufiger sind Kollisionen, bei denen nahezu 180° zwischen beiden Fahrzeugen liegen und zwischen 60 % und 100 % Überdeckung auftreten. In absoluten Zahlen ausgedrückt fallen 19 Unfälle (0,5 % aller Front-Heck-Unfälle) in die identifizierten Intervalle, wobei erneut kein Unfall davon Verletzungen der Klassifikation MAIS 3 oder schwerer aufwies. Situation D ist als kritische, aber sehr seltene Situation zu dokumentieren.

### 2.8.5 Situation E: Pkw-Pfahl-frontal, 70 cm neben der Fahrzeuglängsachse bei einem Winkel von $-20^\circ$ zur Fahrzeuglängsachse, Pfahldurchmesser 60 cm

Durchführung

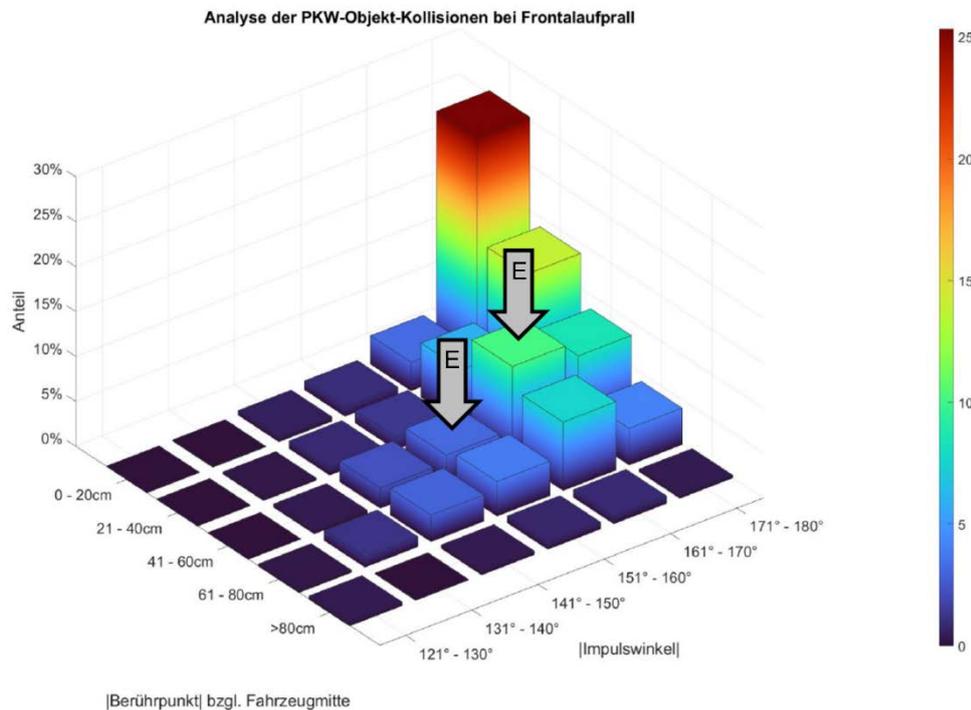


Abbildung 2-40: Analyse von Überdeckungsgrad und Impulswinkel bei frontalen Pfahl-Kollisionen

Die obenstehende Abbildung zeigt eine Übersicht der Kollisionsparameter *Berührungspunkt* und *Impulswinkel* bei frontalen Pfahl-Kollisionen im Masterdatensatz. Anhand dieser Analyse kann abgeleitet werden, dass die Häufigkeit der Situation E etwa im Mittelfeld des untersuchten Datensatzes liegt. Deutlich häufiger sind frontale, mittige Pfahl-Kollisionen, bei denen sich das Fahrzeug fast gerade an das Hindernis annähert. In absoluten Zahlen ausgedrückt fallen 143 Unfälle (10,8 % aller Front-Front-Unfälle) in die identifizierten Intervalle, wobei 23 Unfälle davon Verletzungen der Klassifikation MAIS 3 oder schwerer aufwiesen.

Im Rahmen dieser Analyse wurde der Pfahldurchmesser nicht berücksichtigt. Das lässt sich zum einen auf die erwartete sehr starke Reduktion der Häufigkeit und zum anderen auf den geringen Einfluss des Pfahldurchmessers auf die Verletzungsschwere der Variation (siehe Kapitel 2.7.5) zurückführen.

Situation E ist als kritische und häufige Situation zu berücksichtigen.

### 2.8.6 Zwischenfazit

Durch die Analyse der Häufigkeiten von Kollisionsparametern im realen Unfallgeschehen durch die VUFO konnten die kritischen Situationen A, B und E als relevant beurteilt werden. Bezüglich der getesteten Kollisionssituationen des Euro NCAP muss jedoch gesagt werden, dass diese kaum weniger kritisch und ebenfalls sehr häufig im Unfallgeschehen vertreten sind. Eine klare Empfehlung kann demnach nach aktuellem Stand nicht abgeleitet werden.

Zukünftig erscheint außerdem die kombinierte Darstellung und Auswertung von Verletzungsrisiken und Unfallhäufigkeiten sinnvoll, um direkt kritische Situationen mit großer Häufigkeit zu identifizieren.

## 2.9 AP 3.8 Konzepte und Beispiele für eine vollständige Systembewertung bzw. eine Crashkompatibilitätserkennung

Durchführung

### 2.9.1 Systembewertung eines bestehenden Fahrerassistenzsystems (ADAS)

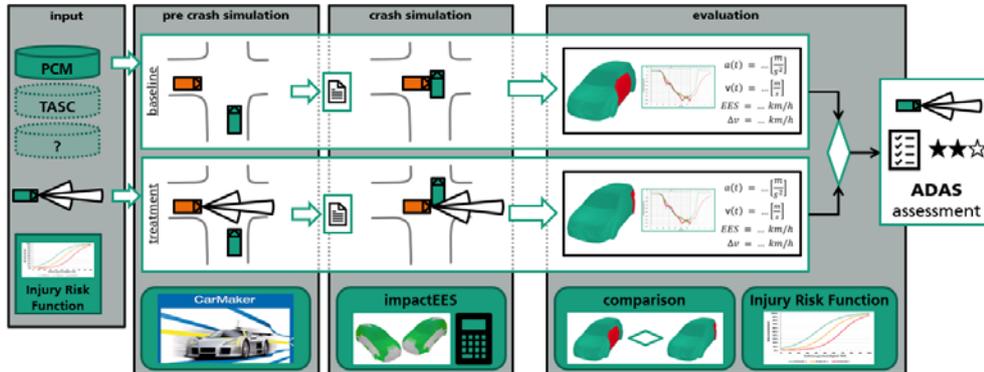


Abbildung 2-41: Ablauf einer Systembewertung (ADAS) mit *impactEES*

In der Abbildung ist ein möglicher Ablauf einer Systembewertung abgebildet. Durch die Simulation von Unfalldaten bis zur Kollision und die anschließende Simulation der Kollision in *impactEES* können technische und medizinische Unfallschwereparameter der realen Unfälle berechnet werden. Durch erneute Simulation der realen Unfälle unter Nutzung fiktiver Fahrzeuge mit ADAS werden die Vermeidbarkeit oder die Veränderung der Kollisionen untersucht. Vermiedene Kollisionen ermöglichen die direkte Ableitung des Verbesserungspotentials eines ADAS. Die veränderten Kollisionen können nun mit Hilfe von *impactEES* erstmals automatisiert und in kurzer Zeit berechnet werden, sodass der Vergleich der technischen und medizinischen Unfallparameter ohne und mit ADAS möglich ist. Durch den Vergleich kann die potenzielle Verbesserung des Unfallgeschehens durch den Einsatz des getesteten ADAS abgeschätzt werden.

Um den Ablauf eines solchen Vergleiches beispielhaft zu zeigen, wurde eine fiktive Unfallsituation einmal ohne und einmal mit ADAS simuliert. Zwei Pkw kollidieren an einer klassischen, senkrechten rechts-vor-links-Kreuzung. Keiner der beiden Beteiligten reagiert, sodass beide ungebremst kollidieren.

Durch die Implementierung eines ADAS in Fahrzeug 1 (in Abbildung 2-42 orange) verzögert das Fahrzeug kurz vor der Kollision. Hierbei wird angenommen, dass Fahrzeug 1 0,8 Sekunden vor der Kollision den Bremsenriff auslöst. Nach einer Schwellzeit von 0,2 Sekunden (linearer Aufbau) verzögert Fahrzeug 1 mit  $5 \text{ m/s}^2$ , bis es zur Kollision kommt. Durch den Bremsenriff verändern sich Anstoßpunkt und Kollisionsgeschwindigkeit, wie in Abbildung 2-42 anhand der Deformationen und Werte abgelesen werden kann.

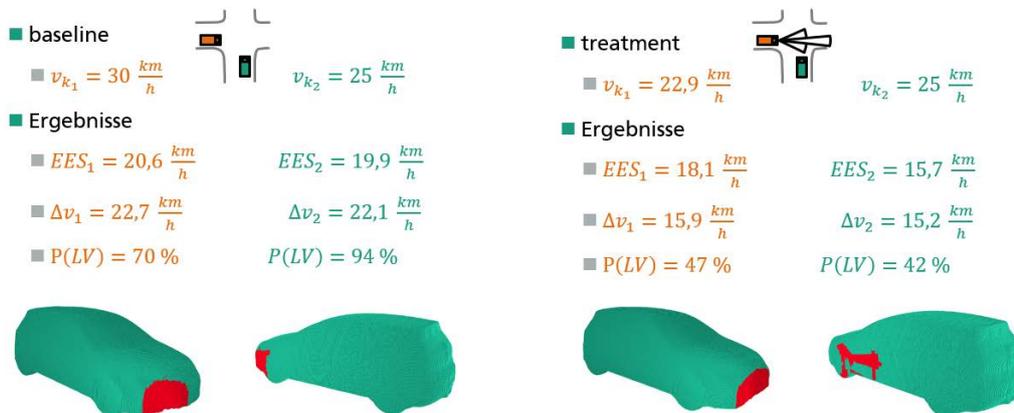


Abbildung 2-42: Gegenüberstellung der Kollisionsgeschwindigkeit  $v_k$ , der EES, der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  sowie der Verletzungsrisiken für eine leichte Verletzung  $P(LV)$  ohne ADAS (baseline, links) und mit ADAS (treatment, rechts)

Die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse ohne (links) und mit ADAS (rechts) zeigt, dass das gewählte ADAS die Verletzungsrisiken für beide Beteiligten durch die Verringerung von  $\Delta v$  und EES senken kann. Durch die Simulation vieler solcher Situationen kann eine statistisch begründete Aussage über das Verbesserungspotential eines ADAS getroffen werden.

### **2.9.2 Echtzeitanwendung zur Ableitung einer pre-crash action zur Verringerung der Verletzungsrisiken**

Anhand der schnellen Berechnung von Verletzungsrisiken für Kollisionsbeteiligte ist eine Anwendung der Simulation zur Ableitung von Eingriffen eines Fahrerassistenzsystems (ADAS) denkbar. Eine Herausforderung hierbei ist, dass die Simulation aufgrund der wenigen Sekunden Berechnungsdauer derzeit nicht echtzeitfähig ist.

Um diese Herausforderung zu umgehen, ist die Entwicklung einer Art Nachschlagewerk für Verletzungsrisiken möglich. Dieses könnte in Tabellenform aufgebaut sein und in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie Anstoßpunkt, Winkel und Geschwindigkeit Verletzungsrisiken für kollidierende Pkw bereithalten. Das Nachschlagewerk könnte im Vorfeld durch Variation berechnet werden und lehnt sich damit sehr stark an die in Kapitel 2.7 entwickelte Methode an.

Ein potenzielles ADAS muss dann die Geschwindigkeiten, die Positionen sowie die Winkel des eigenen Fahrzeuges und des gegnerischen Fahrzeuges kennen. Weiterhin müssen dem ADAS verschiedene mögliche Eingriffe wie bremsen oder lenken zur Verfügung stehen. Ausgehend von diesen Parametern kann dann durch Vorhersage der resultierenden Kollisionssituation untersucht werden, welche verschiedenen Situationen durch die verschiedenen Eingriffe des ADAS erzeugt werden können. Die abschließende Auswahl für einen Eingriff erfolgt dann anhand des Nachschlagewerkes, wodurch jeder Kollisionssituation ein Verletzungsrisiko der eigenen und gegnerischen Fahrzeuginsassen zugeordnet werden kann. Dabei sollten die folgenden Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Welche Situation/welcher Eingriff führt zum Gleichbleiben oder zur Verringerung des Verletzungsrisikos der gegnerischen Fahrzeuginsassen?
- Welche Situation/welcher Eingriff kann das Maximum des Verletzungsrisikos der eigenen und gegnerischen Fahrzeuginsassen am stärksten verringern?
- Das ADAS entscheidet „gedächtnislos“ in jeder Iteration (bspw. alle 80 ms) neu, welcher Eingriff anhand der aktuellen Datenlage sinnvoll ist.

Die Bildung eines solchen Nachschlagewerkes und die Einbindung in ein ADAS ist bereits jetzt möglich und wurde in Kapitel 2.7 exemplarisch gezeigt.

Zu Beginn dieses Projektes wurde eine umfassende Literaturrecherche zu aktuellen Methoden der Kollisionssimulation durchgeführt. Auf Basis dieser Recherche ließ sich die Notwendigkeit einer neuen, detaillierten und schnellen Methode ableiten. Die in diesem Projekt entwickelte Methode *VoxelCrash* erfüllt diese Kriterien und wurde zur besseren Nutzung in ein Programm namens *impactEES* implementiert. Dieses ist in der Lage, innerhalb weniger Sekunden umfassende Ergebnisse wie EES-Werte, kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen, Beschleunigungen, Bewegungen und Deformationen zu berechnen.

Das Programm *impactEES* wurde im Verlauf des Projektes anhand von Pkw-Wand-Crashtests, Pkw-Pfahl-Crashtests sowie Pkw-Pkw-Crashtests des ADAC Technikzentrums validiert. Durch Unterbeauftragung der VUFO GmbH wurden Verletzungsrisikofunktionen entwickelt, welche die Ergebnisse der Simulation in Verletzungsrisiken für Insassen übersetzen.

Des Weiteren wurde *impactEES* zur schnellen Berechnung einer großen Variation von Kollisionssituationen genutzt, um die resultierenden Verletzungsrisiken zu untersuchen. Die Identifizierung kritischer Situationen und die anschließende Bewertung dieser anhand des Unfallgeschehens in der GIDAS-Datenbank ermöglicht die Unterstützung der Entwicklung zukünftiger Crashtests.

Auch die Bewertung eines Fahrerassistenzsystems durch Simulation in *impactEES* wurde exemplarisch gezeigt.

Ein Konzept eines Nachschlagewerks zur Abschätzung der durch den Eingriff eines Fahrerassistenzsystems veränderten Verletzungsrisiken in Echtzeit rundet die Ergebnisse des Projektes ab.

Trotz der vielen Errungenschaften dieses Projekts können auch zukünftig viele weitere Themen im Zusammenhang mit dem neu entwickelten Programm *impactEES* erforscht werden:

- Zu den möglichen Weiterentwicklungen der Berechnungsmethode zählen
  - o die Entwicklung einer Vorschrift für indirekte Deformationen (neben den direkten Kontaktstellen),
  - o die Übertragung der Methode in den dreidimensionalen Raum unter Berücksichtigung der Vertikaldynamik von Pkw sowie
  - o die Übertragung der Simulationsergebnisse auf Dummy-Belastungswerte.
- Aufbauend auf die Möglichkeit eine Vielzahl von Kollisionssituationen zu berechnen, ist die Simulation von TASC-Daten des Fraunhofer IVI (polizeiliche Unfalldaten) denkbar. Durch die Kombination von polizeilichen Unfalldaten mit technischen Kollisionsschwereparametern aus *impactEES* ist die Berechnung neuer und detaillierter Verletzungsrisikofunktionen möglich.
- Auch die Weiterentwicklung des konzeptionellen Nachschlagewerks für Fahrerassistenzsysteme bis hin zur tatsächlichen Anwendung zur Ableitung von Eingriffen eines realen Fahrerassistenzsystems sollte zukünftig weiterverfolgt werden.
- Die Optimierung des Programms hinsichtlich der Rechenzeit wird vor allem für dreidimensionale Berechnungen relevant sein und sollte daher ebenfalls nicht vernachlässigt werden. Auch sollten fortlaufende Validierungen die Weiterentwicklungen stützen und dokumentieren.

**Allen R. York; Terry D. Day:**

*The DyMesh Method for Three-Dimensional Multi-Vehicle Collision Simulation.* in: SAE Technical Papers Series, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 1.-4. März 1999,

**Alvarez, Stephanie; Page, Yves; Sander, Ulrich; Fahrenkrog, Felix; Helmer, Thomas; Jung, Olaf; Hermitte, Thierry; Düring, Michael; Döring, Sebastian; Op den Camp, Olaf:**

*Prospective Effectiveness Assessment of ADAS and Active Safety Systems via Virtual Simulation: A Review of the Current Practices.* in: The 25th ESV Conference Proceedings, The 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Detroit, Michigan USA, 05.-08. Juni 2017,

**AnalyzerPro KG:**

*Kinetik und Fahrodynamik.* online im Internet: <https://analyzer.at/analyzer/kinetik-fahrdynamik/>, aufgerufen am 19.02.2020.

**Bartl, Florian:**

*Mechanics 4.* Skript zur Vorlesung. TU Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit, Graz, 2020.

**Brand, Michael:**

*FEM-Praxis mit SolidWorks, Simulation durch Kontrollrechnung und Messung verifizieren.* 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden, 2016.

**Brüderlin, Adolf:**

*Die Mechanik des Verkehrsunfalls bei Kraftfahrzeugen.* Zürich, 1941.

**Burg, Heinz; Moser, Andreas:**

*Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion.* Wiesbaden, 2009.

**Center for Collision Safety and Analysis CCSA:**

*Vehicle Modeling, Finite Elemente Models.* 2020. online im Internet: <https://www.ccsa.gmu.edu/models/>, aufgerufen am 02.10.2020.

**Courant, Richard; Friedrichs, Kurt; Lewy, Hans:**

*Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik.* in: Mathematische Annalen, Berlin 1928. Seite 32–74.

**Day, Terry D.:**

*An Overview of the EDSMAC4 Collision Simulation Model.* in: SAE Technical Papers Series, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 1.-4. März 1999,

**Day, Terry D.; Roberts, Sydney G.; York, Allen R.:**

*SIMON: A New Vehicle Simulation Model for Vehicle Design and Safety Research.* in: SAE Technical Papers Series, SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan, 5.-8. März 2001,

**DSD Dr. Steffan Datentechnik:**

*PC-Crash.* online im Internet: [http://www.dsd.at/index.php?option=com\\_content&view=article&id=509:pc-crash-deutsch-sicherung&catid=53&lang=de&Itemid=175](http://www.dsd.at/index.php?option=com_content&view=article&id=509:pc-crash-deutsch-sicherung&catid=53&lang=de&Itemid=175), aufgerufen am 19.02.2020.

**DSD Dr. Steffan Datentechnik:**

*PC-Crash, Ein Simulationsprogramm für Verkehrsunfälle, Bedienungs- und technisches Handbuch.* Linz, 2018.

**EDC Engineering Dynamics Corporation:**

*HVE Human-Vehicle-Environment.* online im Internet:  
<http://edccorp.com/products/hve.html>, aufgerufen am 19.02.2020.

**Fittanto, Daniel A.; Ruhl, Roland A.; Southcombe, Ericka J.; Burg, Heinz; Burg, Jurgen:**

*Overview of CARAT-4, a Multi-body Simulation and Collision Modeling Program.* in: SAE Technical Paper Series, SAE 2002 Automotive Dynamics & Stability Conference and Exhibition, 07. Mai 2002,

**Fundowicz, Piotr; Sar, Hubert:**

*Estimation of mass moments of inertia of automobile.* in: XI International Science-Technical Conference Automotive Safety, XI International Science-Technical Conference Automotive Safety, Casta - Papiernicka, 18.-20. April 2018. Seite 1–6.

**Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Schröder, Jörg; Wall, Wolfgang A.:**

*Technische Mechanik, Band 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden.* 7. Auflage. Berlin, Heidelberg, 2009.

**Klein, Bernd:**

*FEM, Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau.* 10., verb. Aufl. Wiesbaden, 2015.

**McHenry, Brian G.:**

*The Algorithms of CRASH.* 2001. online im Internet:  
<http://mchenrysoftware.com/SECCC%20Presentation.pdf>, aufgerufen am 19.02.2020.

**McHenry, Raymond R.:**

*Development of a Computer Program to Aid the Investigation of Highway Accidents.* Calspan Report No. DOT/HS 800 621. Buffalo, 1971.

**REC-TEC:**

*REC-TEC Features.* online im Internet: <http://www.rec-tec.com/RTFeatures.html#Features>, aufgerufen am 19.02.2020.

**Schmitt, Kai-Uwe; Walz, Felix; Muser, Markus H.; Niederer, Peter F.:**

*Trauma-Biomechanik, Verletzungen in Straßenverkehr und Sport.* 1. Aufl. Berlin Heidelberg, 2010.

**Schneider, Kilian; Sequeira, Gerald; Lugner, Robert; Brandmeier, Thomas:**

*Crash Severity Estimation in Oblique Crashes for Integrated Safety Systems.* in: Proceedings of the 5th International Symposium on Future Active Safety Technology toward Zero Accidents, FAST-zero '19, Blacksburg, VA, USA, 09. - 11. September 2019,

**Spitzhüttl, Florian; Liers, Henrik:**

*Methodik zur Erstellung von Verletzungsrisikofunktionen aus Realunfalldaten.* Verband der Automobilindustrie e.V.; Berlin; 2016

**Vajna, Sándor; Weber, Christian; Zeman, Klaus; Hehenberger, Peter; Gerhard, Detlef; Wartzack, Sandro:**

*CAX für Ingenieure, Eine praxisbezogene Einführung. 3., vollständig neu bearbeitete Auflage.* Berlin, 2018.

-----  
Zusammenfassung und Ausblick  
-----

**Varat, Michael S.; Husher, Stein E.:**

*Crash Pulse Modeling for Vehicle Safety Research.* in: The 18th ESV Conference Proceedings, The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Nagoya, Japan, 19.-22. Mai 2003,

**Virtual CRASH LLC:**

*Virtual CRASH Features.* online im Internet: <https://www.vcrashusa.com/features>, aufgerufen am 19.02.2020.

**Wei, Zuolong; Krimi, Hamid R.; Robbersmyr, Kjell G.:**

*A Model Of Vehicle-Fixed Barrier Frontal Crash and its Application in the Estimation of Crash Kinematics.* in: The 24th ESV Conference Proceedings, The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Gothenburg, Sweden, 08.-11. Juni 2015,

**Zhao, Lin; Pawlus, Witold; Karimi, Hamid R.; Robbersmyr, Kjell G.:**

*Data-Based Modeling of Vehicle Crash Using Adaptive Neural-Fuzzy Inference System.* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, Ausgabe: 19 (2). Seite 684–696.