

# Die Verwendung von Crashtestergebnissen bei unterschiedlichen Unfall- und Testfahrzeugmassen

Von Wolfram Kalthoff, Ralf Bührmann, Bernd Fago\*

Die Ergebnisse aus Kollisionsversuchen sind für die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen ein wichtiges Hilfsmittel. In der Praxis sind jedoch die Versuchsergebnisse nicht immer eins zu eins auf den konkreten Fall übertragbar. Dieser Artikel beschreibt, was bei der Verwendung von Crashtestergebnissen bei unterschiedlichen Unfall- und Testfahrzeugmassen beachtet werden muss. Der Aufsatz ist die erweiterte Fassung des auf der EVU-Tagung 2012 in Brasov gehaltenen Vortrags „Besondere Aspekte bei der Nutzung von Crashtests zur Rekonstruktion von Verkehrsunfällen“.

## 1 Einleitung

Bei der Rekonstruktion eines Verkehrsunfalls sind in der Regel kollisionsmechanische Größen wie Kollisionsgeschwindigkeiten und kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen zu bestimmen. Hierbei ist es hilfreich, die Ergebnisse aus Crashversuchen heranzuziehen.

Aufgrund der schier unerschöpflichen Anzahl möglicher Anstoßkonfigurationen in Verbindung mit unterschiedlichsten Fahrzeugtypen ist es in der täglichen Gutachterpraxis jedoch eher selten, einen Versuch zu finden, der dem realen Fall exakt gleicht. Im Regelfall hat man einen prinzipiell passenden Vergleichsversuch, der jedoch bezüglich einzelner Parameter vom realen Unfallgesche-

hen abweicht. So kann es beispielsweise sein, dass sich die Struktursteifigkeiten der Fahrzeuge aus dem realen Unfallgeschehen merklich von den Steifigkeiten der Fahrzeuge aus dem Crashversuch unterscheiden oder dass der Überdeckungsgrad beim herangezogenen Crashversuch anders als beim Realunfall ist.

In den allermeisten Fällen werden allerdings die Massen der am Crash beteiligten Fahrzeuge von denjenigen der Fahrzeuge des realen Unfallgeschehens abweichen. Ist diese Abweichung gering, so kann der Vergleichsversuch problemlos herangezogen werden. Die Massendifferenz fließt dann in das ohnehin bei der Übertragung von Versuchsergebnissen auf den realen Fall zu berücksichtigende Toleranzintervall

mit ein. Was aber, wenn der Massenunterschied zwischen den Versuchs- und den Unfallfahrzeugen mehrere Hundert Kilogramm oder sogar mehr ausmacht? Ist dann die Verwendung von Vergleichsversuchen zur Bestimmung der Geschwindigkeiten der Unfallfahrzeuge noch sinnvoll? Der vorliegende Artikel soll eine Antwort auf diese Fragen geben und aufzeigen, wie in derartigen Fällen vorzugehen ist.

## 2 Vorgehensweise

Stellvertretend für zahlreiche andere Kollisionstypen soll die angesprochene Problematik vor allem am Beispiel der Heckauffahrkollision erörtert werden. Dieser Kollisionstyp tritt häufig auf und ist bezüglich der zugrunde liegenden kollisionsmechanischen Zusammenhänge als vergleichsweise einfach einzustufen.

Das Ziel der Analyse einer Heckauffahrkollision ist in der Regel die Bestimmung der Relativgeschwindigkeit zwischen dem stoßenden und dem gestoßenen Fahrzeug. Darauf aufbauend können die kollisionsbedingten



Geschwindigkeitsänderungen der unfallbeteiligten Fahrzeuge ermittelt werden. Anhand dieser Analyseergebnisse lassen sich dann beispielsweise Aussagen zu Verletzungsmöglichkeiten oder zur Auffahrreihenfolge bei Serienkollisionen treffen.

Prinzipiell gibt es für die Bestimmung der Relativgeschwindigkeit zwei alternative Möglichkeiten. Kennt man die von den Fahrzeugen aufgenommene Deformationsenergie, so lässt sich unter Berücksichtigung der Fahrzeugmassen die Relativgeschwindigkeit nach **GLEICHUNG (1)** berechnen.

Die von den Fahrzeugen aufgenommenen Deformationsenergien werden dabei durch den jeweiligen EES-Wert repräsentiert. In Gleichung 1 fließt zur Beschreibung des teilelastischen Kollisionsverhaltens die Stoßziffer  $k$  ein. Die bei Heckauffahrkollisionen anzusetzenden Stoßziffern wurden in [1] und [2] ausführlich beschrieben.

Sind die von den Fahrzeugen aufgenommenen Deformationsenergien dagegen nicht bekannt und liegen geeignete Fahrzeug-Fahrzeug-Versuche vor, so lässt sich aus diesen auch direkt die Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge des realen Unfallgeschehens ablesen. Optimalerweise nutzt man beide genannten Möglichkeiten und kommt somit zu einer rundum abgesicherten Lösung.

Bei beiden Alternativen werden die Ergebnisse von Vergleichsversuchen herangezogen. Demgemäß kann auch bei beiden Möglichkeiten die Problematik unterschiedlicher Fahrzeugmassen im Versuch und im Fall auftreten.

Bei der Bestimmung der Relativgeschwindigkeit anhand von EES-Werten stellt sich folglich die Frage, wie die EES-Werte aus den Versuchen auf die realen Fahrzeuge zu übertragen

sind. Bei der direkten Bestimmung der Relativgeschwindigkeit anhand von Fahrzeug-Fahrzeug-Versuchen muss geklärt werden, welchen Einfluss das gegebenenfalls abweichende Massenverhältnis der Fahrzeuge auf die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse hat.

### 3 EES-Versuche

Die Bestimmung der von den verunfallten Fahrzeugen aufgenommenen Deformationsenergie (EES-Wert) kann nur anhand eines Vergleichs mit den Ergebnissen aus Barrierenanprallversuchen erfolgen. Fahrzeug-Fahrzeug-Versuche liefern keine eindeutige Aussage über die Aufteilung der Deformationsenergien auf die beteiligten Fahrzeuge, sodass sich derartige Versuche nicht zur Bestimmung der EES-Werte eignen.

Bei der Übertragung von Versuchsergebnissen zur Eingrenzung des EES-Wertes auf das reale Unfallgeschehen sind zahlreiche Parameter zu berücksichtigen. In [3] wird ein Überblick gegeben und beschrieben, wie zu verfahren ist, wenn beispielsweise die Deformationstiefen des Versuchs- und des Unfallfahrzeugs gleich sind, der Überdeckungsgrad sich jedoch deutlich unterscheidet. Neben weiteren Aspekten wird schließlich darauf hingewiesen, dass bei der Nutzung von Crashversuchen durchaus eine deutliche Differenz zwischen der Masse des Versuchsfahrzeugs und derjenigen des (real) verunfallten Pkw vorliegen kann.

Die Verwendung von Ergebnissen aus Crashversuchen gründet auf einen „visuellen Vergleich“ der Beschädigungsbilder. Man vergleicht letztlich den Verformungsumfang des verunfallten Fahrzeugs mit der aus einem Versuch resultierenden

Deformation eines Crashfahrzeugs. Der Verformungsumfang ist also der „abgelesene“ Parameter. Ziel des Vergleichs mit Versuchsergebnissen ist aber, eine Aussage über die vom verunfallten Fahrzeug aufgenommene Deformationsenergie treffen zu können.

Dabei obliegt es dem Sachverstand des Experten, die Verformungstiefe und deren Ausprägung am Fahrzeug zu beurteilen. Weiterhin sind Parameter wie Anstoßhöhe (gebremstes oder ungebremstes Auffahren), Struktursteifigkeit (Anhängerkupplung) oder besondere Anstoßkonfigurationen (Winkelstellung) zu berücksichtigen.

Hat man eine vergleichbare Verformung an einem dem Unfallfahrzeug ähnlich struktursteifen und schweren sowie analog beaufschlagten Versuchsfahrzeug, so lässt sich dessen EES-Wert zur Beschreibung der aufgenommenen Deformationsenergie unmittelbar auf das Unfallfahrzeug übertragen. Sind hingegen die Verformungen des Versuchs- und des Unfallfahrzeugs gleich, nicht jedoch deren Massen, muss bei der Übertragung des EES-Wertes auf den Realfall differenziert vorgegangen werden. Dabei sind drei verschiedene Fälle zu unterscheiden.

#### 3.1 Fall 1

Beim ersten Fall sind sowohl das Crashfahrzeug als auch das real verunfallte Fahrzeug nahezu identisch. Die Beschädigungen (Verformungstiefen) und die Struktursteifigkeiten sind vergleichbar. Der Unterschied liegt allein in den Fahrzeugmassen. So kann es beispielsweise sein, dass im Crash das Fahrzeug mit seinem Leergewicht getestet wurde. Im realen Unfallgeschehen dagegen war das Fahrzeug mit Insassen voll besetzt oder beladen und verunfallte somit mit seinem zulässigen Gesamtgewicht. Unter der Voraussetzung, dass die Insassen beziehungsweise die Ladung vollständig an der Kollision teilnehmen, gilt für die vom verunfallten Fahrzeug aufgenommene Deformationsenergie **GLEICHUNG (2)**

$$v_{rel} = \frac{1}{\sqrt{1-k^2}} \cdot \sqrt{\frac{m_1 \cdot EES_1^2 + m_2 \cdot EES_2^2}{\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}}} \quad \text{Gl. (1)}$$



**BILD 1:** Opel Kadett,  $v=22,9$  km/h,  $EES=22,6$  km/h,  $m=991$  kg,  $E_{def}=19.527$  Nm ([4]: 11927)

**FIGURE 1:** Opel Kadett,  $v=22.9$  km/h,  $EES=22.6$  km/h,  $m=991$  kg,  $E_{def}=19.527$  Nm ([4]: 11927)



**BILD 2:** Opel Kadett,  $v=19,3$  km/h,  $EES=19,1$  km/h,  $m=1406$  kg,  $E_{def}=19.788$  Nm ([4]: 15007)

**FIGURE 2:** Opel Kadett,  $v=19.3$  km/h,  $EES=19.1$  km/h,  $m=1406$  kg,  $E_{def}=19.788$  Nm ([4]: 15007)

(Index F:=Fahrzeug aus dem Fall, Index C:=Fahrzeug aus dem Crash-test).

Die vom Crashfahrzeug aufgenommene Deformationsenergie errechnet sich analog dazu nach **GLEICHUNG (3)**.

Die Deformationsenergien sind eine Funktion der Steifigkeiten und der Verformungstiefen. Diese sind im hier betrachteten Fall beim gecrashten und beim verunfallten Fahrzeug gleich. Damit sind auch die Deformationsenergien beider Fahrzeuge gleich, sodass man nach Umformen **GLEICHUNG (4)** erhält.

Unter den oben genannten Voraussetzungen ist also der EES-Wert aus dem Crashversuch mit dem in Gleichung 4 gezeigten Massenterm zu multiplizieren, um den EES-Wert für das reale Unfallgeschehen zu erhalten.

Ein Beispiel hierzu ist in **BILD 1** und **BILD 2** dargestellt. Bei den beiden gezeigten Opel Kadett sind die Deformationen und demnach die Deformationsenergien nahezu identisch. Da jedoch die Massen verschieden waren, mussten die Fahrzeuge mit abweichenden Geschwindigkeiten mit der Barriere kollidieren. Daraus folgen unterschiedliche EES-Werte bei gleichen Deformationen. Wäre

der schwerere Opel Kadett der verunfallte Pkw und das leichtere Fahrzeug der Versuchs-Pkw, so müsste man – wie zuvor dargelegt – den für das Unfallfahrzeug anzusetzenden EES-Wert über das Massenverhältnis nach **GLEICHUNG (5)** berechnen.

Umgekehrt können zwei unterschiedlich stark verformte, jedoch gleich strukturstiefe Fahrzeuge den gleichen EES-Wert haben. Dieser zunächst widersprüchlich erscheinende Umstand ist, wie den Gleichungen 2 und 3 zu entnehmen, wiederum bei unterschiedlicher Beladung möglich. In **BILD 3** und **BILD 4** sind die Beschädigungen zweier baugleicher Volks-

wagen Golf gezeigt (Anstoßkonfiguration siehe **BILD 5** und **BILD 6**). Die Barrierenanprallversuche wurden mit fast gleicher Geschwindigkeit durchgeführt, sodass auch der EES-Wert bei beiden Fahrzeugen nahezu identisch ist. Die Schäden an dem einen Pkw sind jedoch deutlich ausgeprägter als an dem anderen. Dies liegt in den unterschiedlichen Testmassen begründet. Der eine Pkw wurde mit seinem Leergewicht und der andere mit merklicher Beladung gecrasht. Die größere Masse ist mit einer höheren kinetischen Eingangsenergie verbunden. Daraus resultiert am schweren Fahrzeug eine höhere Deformations-

$$E_{defF} = \frac{1}{2} \cdot m_F \cdot EES_F^2 \quad \text{Gl. (2)}$$

$$E_{defC} = \frac{1}{2} \cdot m_C \cdot EES_C^2 \quad \text{Gl. (3)}$$

$$EES_F = \sqrt{\frac{m_C}{m_F}} \cdot EES_C \quad \text{Gl. (4)}$$

$$18,9 \text{ km/h} = \sqrt{\frac{991 \text{ kg}}{1406 \text{ kg}}} \cdot 22,6 \text{ km/h} \quad \text{Gl. (5)}$$



**BILD 3:** Versuch 1, VW Golf,  $v=7,9$  km/h,  $EES=7,6$  km/h,  $m=896$  kg,  $E_{def}=1996$  Nm ([4]: 11025)

**FIGURE 3:** Test 1, VW Golf,  $v=7.9$  km/h,  $EES=7.6$  km/h,  $m=896$  kg,  $E_{def}=1996$  Nm ([4]: 11025)



**BILD 4:** Versuch 2, VW Golf,  $v=8,1$  km/h,  $EES=7,9$  km/h,  $m=1208$  kg,  $E_{def}=2908$  Nm ([4]: 11026)

**FIGURE 4:** Test 2, VW Golf,  $v=8.1$  km/h,  $EES=7.9$  km/h,  $m=1208$  kg,  $E_{def}=2908$  Nm ([4]: 11026)



**BILD 5:** Versuch 1, Anstoßkonfiguration 100%, 0°

**FIGURE 5:** Test 1, impact configuration 100%, 0°



**BILD 6:** Versuch 2, Anstoßkonfiguration 100%, 0°

**FIGURE 6:** Test 2, impact configuration 100%, 0°

energie, ausgedrückt in einer entsprechend größeren Verformungstiefe.

Somit ist zu beachten, dass die Verformungstiefen bei gleichen Fahrzeugen nicht zwangsläufig mit den EES-Werten gleichzusetzen sind; es muss auch immer die Fahrzeugmasse berücksichtigt werden.

Als Zwischenergebnis ist festzuhalten: Letztendlich kommt es für die Unfallrekonstruktion darauf an, die im Unfallfahrzeug enthaltene Deformationsenergie zu erfassen. Diese Deformationsenergie ist mit derjeni-

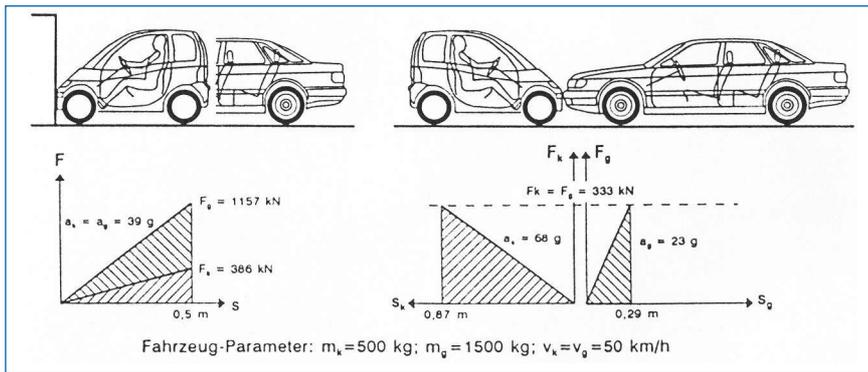
gen eines baugleichen (oder in guter Näherung strukturgleichen) und gleich stark verformten Crashfahrzeugs identisch, unabhängig davon, mit welcher Beladung beziehungsweise Geschwindigkeit die gleich starken Verformungen entstanden sind. Die Information über die Deformationsenergie des Crashfahrzeugs wird in Form seines Crash-EES-Wertes und der zugehörigen Crashmasse bereitgestellt.

In die Rekonstruktionsberechnungen muss das Unfallfahrzeug aber

mit seiner Unfallmasse eingesetzt werden. Weichen Unfallmasse und Crashmasse voneinander ab, ist es für die korrekte Übernahme der Deformationsenergie erforderlich, den Crash-EES-Wert über das Massenverhältnis gemäß Gleichung 4 in den Unfall-EES-Wert umzurechnen.

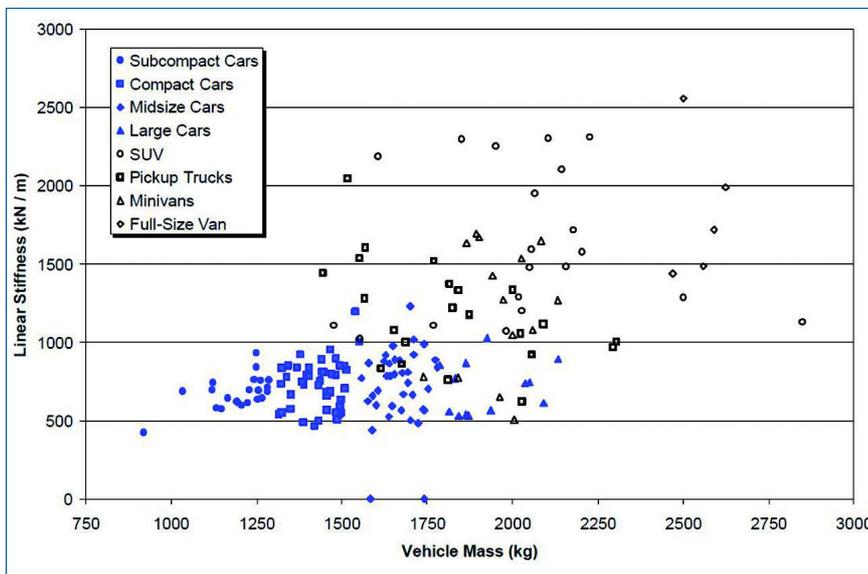
### 3.2 Fall 2

Der zweite, in der Gutachterpraxis häufigste Fall liegt vor, wenn zur Bestimmung des EES-Wertes eines verunfallten Pkw ein nicht identisches



**BILD 7:** Barrierenanprall und Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision bei massenproportionaler Auslegung [5]

**FIGURE 7:** Barrier impact and vehicle-vehicle collision with mass-proportional interpretation [5]



**BILD 8:** Relation frontale Steifigkeit und Fahrzeugmasse aus NCAP-Versuchen [6]

**FIGURE 8:** Relation between front-end stiffness and vehicle mass from NCAP tests [6]

Versuchsfahrzeug mit gut vergleichbarer Beschädigung gefunden wurde, dessen Leermasse jedoch von derjenigen des Unfallfahrzeugs abweicht. Hier stellt sich für den Unfallrekonstrukteur die Frage, ob nun der EES-Wert direkt übernommen werden kann oder die Deformationsenergie der beiden Fahrzeuge gleich ist.

Um diese Fragestellung zu beantworten, ist in GLEICHUNG (6) der prinzipielle Zusammenhang zwischen Masse, EES-Wert, verformender Kraft und Verformungstiefe  $S_{stat}$  dargestellt.

Die deformierende Kraft  $F$  ist eine Funktion der Struktursteifigkeit

und der Verformungstiefe. Die vom Fahrzeug aufgenommene Deformationsenergie ist mithin abhängig von diesen beiden Parametern. Um einen Vergleichsversuch mit einem vom realen Fall in seiner Leermasse abweichenden Crashfahrzeug zur Bestimmung des EES-Wertes beziehungsweise der Deformationsenergie heranziehen zu können, muss also die Relation zwischen den Struktursteifigkeiten des Unfall- und des Versuchsfahrzeugs untersucht werden.

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass Fahrzeuge unterschiedlicher Leermassen auch unterschiedliche Struktursteifigkeiten besitzen. Dies

liegt in der konstruktiven Auslegung begründet, die konventionell auf einem Barrierenanpralltest fußt. Hierbei steht allen Fahrzeugen bei einer definierten Geschwindigkeit (Sicherheitsstandard FMVSS 208, Federal Motor Vehicle Safety Standards, USA beziehungsweise CMVSS 208, Canadian Motor Vehicle Safety Standard, auch NSVAC 208, Normes de Sécurité des Véhicules Automobiles du Canada, Kanada) die gleiche vorgegebene Verformungstiefe (0,5 m) und die gleiche Verzögerung zur Verfügung [5]. Die prinzipiellen Zusammenhänge veranschaulicht der linke Teil von BILD 7.

Bei gleicher Verformungstiefe, das heißt gleicher mittlerer Verzögerung, ist der Kraftpegel beim schwereren Fahrzeug höher. Entsprechend muss das schwerere Fahrzeug struktursteifer ausgelegt sein. Damit kann die Steifigkeit als massenproportional angesehen werden. In BILD 8 sind die Steifigkeiten der Frontstruktur verschiedener Fahrzeuge über der jeweiligen Fahrzeugmasse aufgetragen. Die Werte unterliegen einer starken Streuung, bestätigen aber, dass im Mittel die Steifigkeit mit zunehmender Masse linear ansteigt. Für Fahrzeuge mit einer linearen Kraft-Weg-Kennung der beaufschlagten Struktur berechnet sich die Deformationsenergie aus GLEICHUNG (7).

Möchte man nun konventionell, das heißt mit massenproportionaler Struktursteifigkeit ausgelegte Fahrzeuge im Crashversuch und im realen Unfallgeschehen bezüglich der aufgenommenen Deformationsenergie vergleichen, so ist die Beziehung nach GLEICHUNG (8) einzurechnen.

Stellt man die Gleichung 7 für das Versuchs- und das Crashfahrzeug auf und beachtet hierbei Gleichung 8, so folgt nach Umformen, dass gemäß GLEICHUNG (9) das Verhältnis der Verformungstiefen dem Verhältnis der EES-Werte entspricht. Sind nun Unfall- und Crashfahrzeug gleich stark, das heißt mit gleichen Deformationsstiefen beschädigt, ergibt sich die GLEICHUNG (10).

Diese Gleichung beinhaltet die interessante Aussage, dass unter der Voraussetzung einer konventionellen Fahrzeugstruktur und gleicher Verformungstiefen der EES-Wert eines bei einem Crashversuch beaufschlagten Fahrzeugs direkt auf ein bezüglich der Leermasse abweichendes Unfallfahrzeug übertragen werden kann. Ist das gecrashte Fahrzeug beispielsweise schwerer als das Fahrzeug aus dem realen Unfallgeschehen, so sind die EES-Werte unter diesen Voraussetzungen gleich. Die vom Crashfahrzeug aufgenommene Deformationsenergie ist hingegen – aufgrund der höheren Masse – größer (vergleiche Gleichung 7).

Die obige Gleichung gilt natürlich nur, wenn Crash- und Unfallfahrzeug zwar unterschiedliche Leermassen aufweisen, aber nicht beladen sind. In der Praxis wird jedoch oftmals eine Beladung des Unfallfahrzeugs und vielleicht auch des Crashfahrzeugs vorliegen.

Gemäß Gleichung 7 ergibt sich die Deformationsenergie des Unfall- und des Crashfahrzeugs aus der Struktursteifigkeit und dem Verformungsweg. Bei gleicher Deformationstiefe entspricht das Verhältnis der Deformationsenergien dem Verhältnis der Steifigkeiten nach **GLEICHUNG (11)**.

Infolge der Massenproportionalität der Struktursteifigkeiten (vergleiche Gleichung 8) gilt dann analog **GLEICHUNG (12)** für das Verhältnis der Leermassen (Index L).

Die Deformationsenergie der Fahrzeuge mit Beladung beschreibt **GLEICHUNG (13)**.

Nach Gleichsetzen und Umformen der Gleichungen 12 und 13 folgt **GLEICHUNG (14)**, mit der sich unter Berücksichtigung der Leermassen der Fahrzeuge sowie deren Beladung der EES-Wert des beladenen Unfallfahrzeugs  $EES_F$  aus dem EES-Wert des beladenen Crashfahrzeugs  $EES_C$  berechnen lässt.

Um im Verlauf der eigentlich einfachen Rechenschritte den physikalischen Hintergrund im Blick halten zu können, empfiehlt sich jedoch die

schrittweise Übertragung: Von einem ebenfalls konventionell ausgelegten Crashfahrzeug gleicher Verformungstiefe wird der auf seine Leermasse  $m_{LC}$  bezogene EES-Wert herangezogen. (Bei einem beladenen Crashfahrzeug ist aus dessen angegebenem EES-Wert analog zu Gleichung 4 mit einer Massenkorrektur der EES-Wert des leeren Crashfahrzeugs zu errechnen.) Der auf die Leermasse  $m_{LC}$  bezogene EES-Wert des Crashfahrzeugs stimmt mit dem auf die Leermasse  $m_{LF}$  bezogenen EES-Wert des Unfallfahrzeugs überein. Dieser muss dann für die Eingabe in die Rekonstruktionsberechnungen analog zu Gleichung 4 mit einer Massenkorrektur in den EES-Wert des beladenen Unfallfahrzeugs umgerechnet werden.

### 3.3 Fall 3

Die oben beschriebene Auslegung der Karosseriestrukturen (je schwerer, desto struktursteifer) führt bei einer Kollision zwischen einem schweren und einem leichten Fahrzeug dazu, dass das leichte Fahrzeug stärker als das schwere Fahrzeug deformiert wird (vergleiche rechten Teil des Bildes 7). Darüber hinaus erfährt das leichtere Fahrzeug aufgrund der geringeren Masse eine höhere Beschleunigung als das schwerere. Aus Kompatibilitätsgründen wird daher bei modernen Fahrzeugen eine neuartige Kennlinie angestrebt. Hierzu wird die Karosserie des leichten Fahrzeuges versteift. Die aggressive Struktur des masseschweren Fahrzeugs wird dagegen durch eine Verringerung ihrer

$$E_{def} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot EES^2 = \int_0^{s_{stat}} F ds \quad \text{Gl. (6)}$$

$$E_{def} = \int_0^{\hat{s}} F ds = \frac{1}{2} \cdot \hat{F} \cdot \hat{s} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \hat{s}^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot EES^2 \quad \text{Gl. (7)}$$

$$\frac{c_F}{c_C} = \frac{m_F}{m_C} \quad \text{Gl. (8)}$$

$$\frac{s_F}{s_C} = \frac{EES_F}{EES_C} \quad \text{Gl. (9)}$$

$$EES_F = EES_C \quad \text{Gl. (10)}$$

$$\frac{E_{defF}}{E_{defC}} = \frac{c_F}{c_C} \quad \text{Gl. (11)}$$

$$\frac{E_{defF}}{E_{defC}} = \frac{m_{LF}}{m_{LC}} \quad \text{Gl. (12)}$$

$$E_{defC/F} = \frac{1}{2} \cdot (m_{LC/F} + m_{BC/F}) \cdot EES_{C/F}^2 \quad \text{Gl. (13)}$$

$$EES_F = \sqrt{\frac{1 + \frac{m_{BC}}{m_{LC}}}{1 + \frac{m_{BF}}{m_{LF}}}} EES_C \quad \text{Gl. (14)}$$

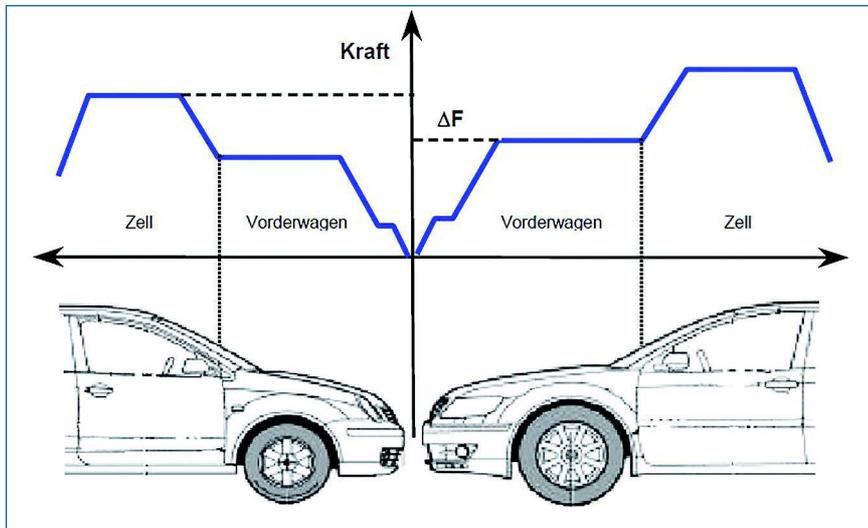


BILD 9: Bulkhead-Konzept [7]

FIGURE 9: Bulkhead concept [7]

Steifigkeit „entschärft“. Das leichte Fahrzeug nutzt den Deformationsweg des schweren Fahrzeugs mit. Allerdings ist das Beschleunigungsniveau des leichten Fahrzeugs immer noch vergleichsweise hoch.

Der Grundgedanke wird im sogenannten „Bulkhead-Prinzip“ (engl. „Spritzwand“) weiterentwickelt. Der Vorbau des leichten Fahrzeugs ist weicher als der des schweren Fahrzeugs ausgelegt. Damit soll sich erst die Front des leichten Pkw verformen. Da aber die Fahrgastzelle steifer als die Front des schweren Fahrzeugs

ist, setzt sich anschließend die Verformung an der Front des schweren Pkw fort, ohne dass es zu Intrusionen des leichten Pkw kommt, BILD 9.

Ein populäres Beispiel für eine extrem steife Fahrzeugauslegung ist der MCC Smart, BILD 10 und BILD 11. Der deutlich schwerere Honda Civic weist dagegen bei gleicher Beanspruchung eine höhere Deformationstiefe auf, BILD 12 und BILD 13.

Um das Kraftniveau und damit das Verzögerungsniveau beziehungsweise die Insassenbelastung in Grenzen zu halten, ist bei leichten Fahrzeugen

eine weitere Änderung der Kennung erforderlich. Gewünscht sind ein sehr schneller Anstieg der Kraft und anschließend ein konstanter Verlauf (Beispiel MCC Smart in BILD 14). Die von Kraft und Verformungsweg aufgespannte Fläche stellt die Deformationsenergie dar. Gegenüber der oben beschriebenen linearen Kennung (vergleiche Honda Civic in BILD 15) ermöglicht der nahezu rechteckige Kraft-Weg-Verlauf die optimale Nutzung der kleinen verfügbaren Eindringtiefe mit einem hinsichtlich der Insassenbelastung noch erträglichen Kraftpegel.

Bei schweren Fahrzeugen dagegen wird die Kennlinie in der Form ausgelegt, dass zunächst aus Kompatibilitätsgründen das Kraftniveau gering ist. Erst bei höherer Verformung steigt die Verformungskraft zum Selbstschutz an. BILD 16 und BILD 17 zeigen die Deformationen einer Mercedes-Benz E-Klasse nach einem Barrierenanprall mit 56,3 km/h. In BILD 18 ist der zugehörige Kraft-Weg-Verlauf dargestellt.

Der Knick in der Kennlinie, das heißt der sprunghafte Zuwachs der Steifigkeit oberhalb einer Verformungstiefe von circa 560 mm, ist deutlich zu erkennen. Die große (dynamische) Gesamtverformung von circa 630 mm sorgt dafür, dass trotz



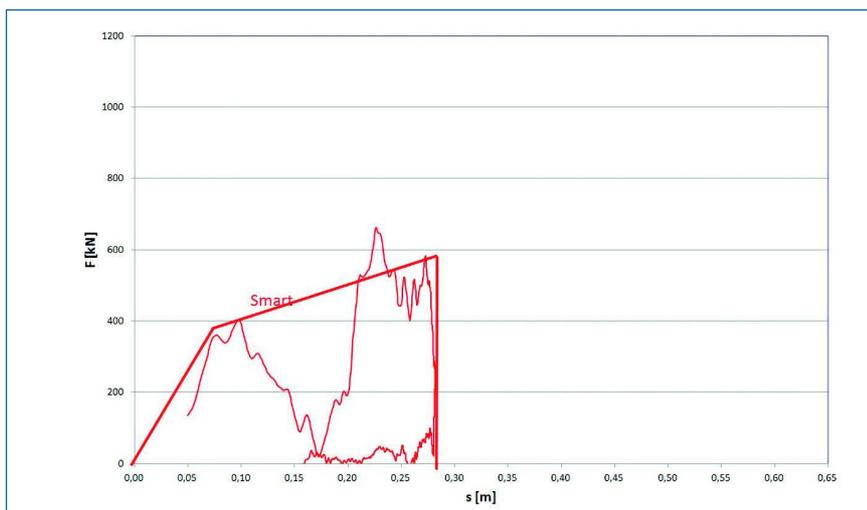
BILD 10 und BILD 11: MCC Smart (Modell 2000) nach Barrierenanprall (CMVSS/NSVAC 208, 48,0 km/h), maximale statische Verformung 217 mm,  $a_{\text{mittel}}=23\text{ g}$ ,  $a_{\text{max}}=\text{circa } 64\text{ g}$ ,  $m=992\text{ kg}$  [8]

FIGURE 10 and FIGURE 11: MCC Smart (model 2000) after barrier impact (CMVSS/NSVAC 208, 48.0 km/h), maximum static crash 217 mm,  $a_{\text{mean}}=23\text{ g}$ ,  $a_{\text{max}}=\text{approx } 64\text{ g}$ ,  $m=992\text{ kg}$  [8]



**BILD 12 und BILD 13:** Honda Civic (Modell 2002) nach Barrierenanprall (FMVSS 208, 48,2 km/h), maximale statische Verformung 372 mm,  $a_{\text{mittel}} = 16 \text{ g}$ ,  $a_{\text{max}} = \text{circa } 30 \text{ g}$ ,  $m = 1325 \text{ kg}$  [8]

**FIGURE 12 and FIGURE 13:** Honda Civic (model 2002) after barrier impact (FMVSS 208, 48.2 km/h), maximum static crash 372 mm,  $a_{\text{mean}} = 16 \text{ g}$ ,  $a_{\text{max}} = \text{approx } 30 \text{ g}$ ,  $m = 1325 \text{ kg}$  [8]



**BILD 14:** Kraft-Weg-Kennung MCC Smart aus Bildern 10 und 11 [8]

**FIGURE 14:** Force-displacement characteristics for MCC Smart from Figures 10 and 11 [8]

der merklich höheren Kollisionsgeschwindigkeit die mittlere Beschleunigung auf dem Niveau des Smarts liegt.

In **BILD 19** sind noch einmal die Kraft-Weg-Kennungen der drei Beispielfahrzeuge gemeinsam dargestellt. Daraus geht hervor, dass der leichteste Pkw (Smart) eine sehr geringe Verformung bei vergleichsweise hohem Kraftniveau erfährt. Der mittlere Pkw (Civic) verformt sich konventionell mit nahezu linear ansteigender Kraft. Der schwere Mercedes deformiert sich

zunächst kompatibel zu einem leichten Pkw auf geringem Kraftniveau. Erst nach einer Verformung von rund 0,5 m steigt die Kraft drastisch an.

Unter Berücksichtigung einer nicht linearen Fahrzeugauslegung gemäß Bild 14 stellt sich die Gleichung 7 näherungsweise wie **GLEICHUNG (15)** dar.

$$E_{\text{def}} = \int_0^{\hat{s}} F ds = \hat{F} \cdot \hat{s} = c \cdot \hat{s}^2 = \frac{1}{2} m EES^2 \quad \text{Gl. (15)}$$

Stellt man die Gleichung 15 sowohl für das Versuchs- als auch für das Unfallfahrzeug auf und berücksichtigt gemäß Gleichung 8 auch hier eine massenproportionale Steifigkeit, so ergibt sich auch für Fahrzeuge mit einer rechteckigen Kraft-Weg-Kennung das bereits in Gleichung 9 gezeigte gleiche Verhältnis von Verformungstiefen und EES-Werten. Folglich gilt wie zuvor bei vergleichbaren Schäden, dass der EES-Wert des Versuchsfahrzeugs direkt auf ein hinsichtlich der Masse abweichendes real verunfalltes Fahrzeug übertragen werden kann.

### 3.4 Weiterführende Berechnungen

Nachdem nun die EES-Werte der unfallbeteiligten Fahrzeuge anhand von Vergleichsversuchen bestimmt wurden, kann nach Gleichung 1 die Relativgeschwindigkeit bestimmt werden. Dabei sind die Massen der Unfallfahrzeuge und die für die Unfallfahrzeuge ermittelten EES-Werte einzugeben. So wird dann die im realen Unfallgeschehen tatsächlich umgesetzte Deformationsenergie verarbeitet.

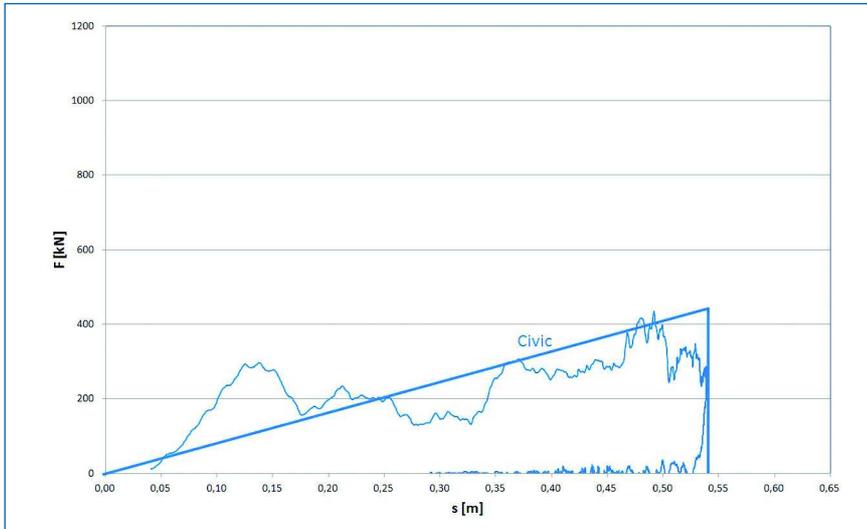


BILD 15: Kraft-Weg-Kennung Honda Civic aus Bildern 12 und 13 [8]

FIGURE 15: Force-displacement characteristics for Honda Civic from Figures 12 and 13 [8]

Die bisherigen Überlegungen setzen voraus, dass für beide unfallbeteiligten Fahrzeuge entsprechende EES-Versuche zur Verfügung stehen. Dies ist jedoch nicht immer der Fall. Deshalb wurde in [9] die für die Gutachterpraxis sehr hilfreiche **GLEICHUNG (16)** hergeleitet, anhand derer bei bekannten Verformungstiefen beziehungsweise bekanntem Verformungstiefenverhältnis der Unfallfahrzeuge aus dem EES-Wert eines Unfallfahrzeugs der EES-Wert seines Kontrahenten berechnet werden kann. Allerdings wurde hierbei vorausgesetzt, dass beide Unfallfahrzeuge gleichartig ausgelegt wurden,

das heißt beide zum Beispiel eine lineare Kennung besitzen. Dies wird in vielen Fällen näherungsweise anzunehmen sein. Die vorangegangenen Erläuterungen zeigen aber auch, dass es durchaus andersartige Kennlinien geben kann.

Ist bei der Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision von massenproportionalen Steifigkeiten der beteiligten Fahrzeuge auszugehen, so lässt sich Gleichung 16 mit (siehe Kasten oben rechts)

$$EES_1 = \sqrt{\frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{s_1}{s_2}} \cdot EES_2 \quad \text{Gl. (16)}$$

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{m_1}{m_2} \quad \text{und}$$

$$F_1 = c_1 s_1, \quad F_2 = c_2 s_2$$

das heißt wegen (actio = reactio)

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{m_2}{m_1}$$

(vergleiche auch Zahlenbeispiel in Bild 7) auf **GLEICHUNG (17)** reduzieren.

$$EES_1 = \frac{m_2}{m_1} \cdot EES_2 \quad \text{Gl. (17)}$$

Dies ist auch unmittelbar einsichtig, da gemäß Prämisse (Massenproportionalität) das Verhältnis der Deformationswege durch das Massenverhältnis bestimmt wird. Das hat den Vorteil, dass in der Praxis nicht einmal mehr das Deformationstiefenverhältnis der unfallbeteiligten Fahrzeuge bekannt sein muss.

#### 4 Fahrzeug-Fahrzeug-Versuche

Alternativ zu EES-Versuchen kann die Relativgeschwindigkeit der Unfallfahrzeuge auch direkt anhand eines Fahrzeug-Fahrzeug-Crashtests ermittelt werden. Dazu vergleicht man



BILD 16 und BILD 17: Mercedes-Benz E350 4Matic (Modell 2010) nach Barrierenanprall (FMVSS 208, 56,3 km/h), maximale statische Verformung 480 mm,  $a_{\text{mittel}}=23 \text{ g}$ ,  $a_{\text{max}}=\text{circa } 57 \text{ g}$ ,  $m=2084 \text{ kg}$  [8]

FIGURE 16 and FIGURE 17: Mercedes-Benz E350 4Matic (model 2010) after barrier impact (FMVSS 208, 56.3 km/h), maximum static crash 480 mm,  $a_{\text{mean}}=23 \text{ g}$ ,  $a_{\text{max}}=\text{approx } 57 \text{ g}$ ,  $m=2084 \text{ kg}$  [8]

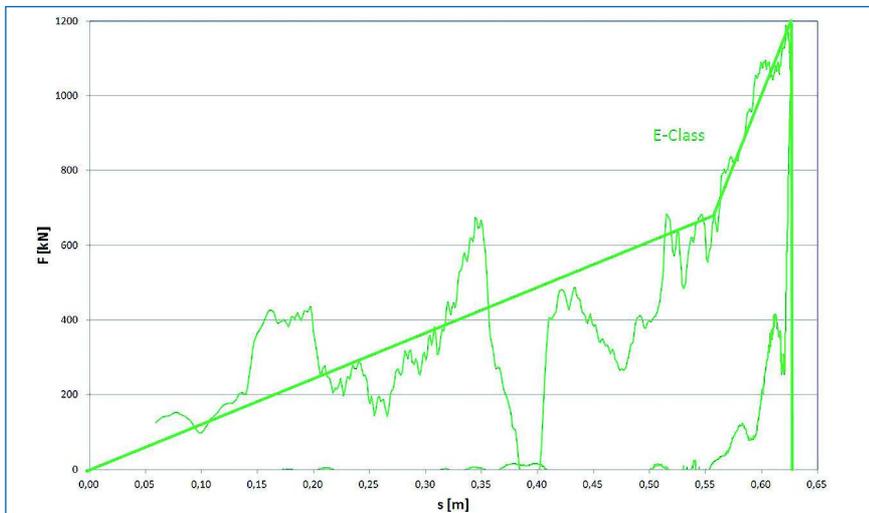


BILD 18: Kraft-Weg-Kennung MB E350 aus Bildern 16 und 17 [8]

FIGURE 18: Force-displacement characteristics for MB E350 from Figures 16 und 17 [8]

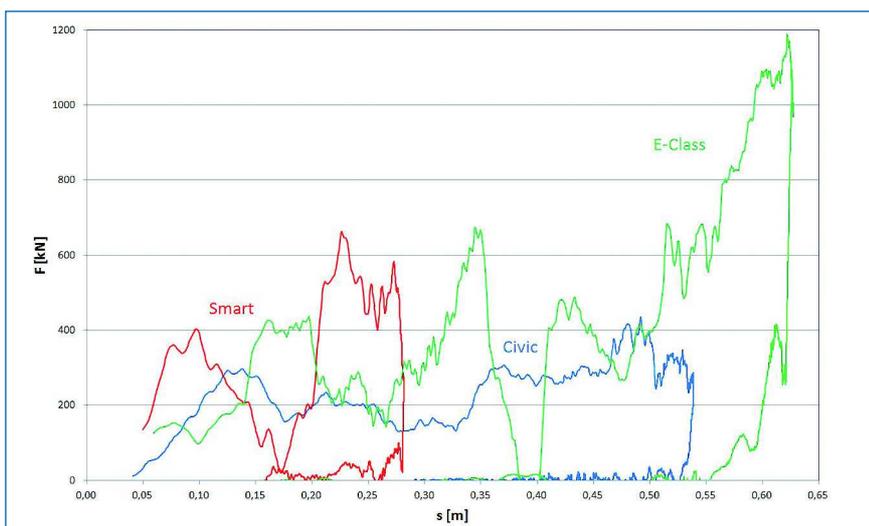


BILD 19: Vergleich Kraft-Weg-Kennungen

FIGURE 19: Comparison of force-displacement characteristics

die Beschädigungsbilder aus einem Crashversuch mit denjenigen der unfallbeteiligten Fahrzeuge. Sind die Beschädigungen und die Fahrzeugmassen im Fall vergleichbar mit den Schäden aus dem Versuch, so muss zwischen den Unfallfahrzeugen etwa die gleiche Relativgeschwindigkeit wie im Versuch vorgelegen haben.

Weichen jedoch die Massen der Testfahrzeuge stark von denjenigen der real verunfallten Fahrzeuge ab, so kann die Relativgeschwindigkeit – trotz gegebenenfalls vergleichbarer

Beschädigungen – nicht mehr ohne Weiteres auf den Fall übertragen werden. Welche Zusammenhänge in derartigen Fällen gelten, soll nachfolgend untersucht werden.

Für eine in der Praxis nutzbare Aussage zur Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse sollen die Beschädigungen an den beiden gestoßenen Fahrzeugen (Crashfahrzeug und Unfallfahrzeug) ebenso wie an den beiden stoßenden Fahrzeugen im Versuch und im realen Fall vergleichbar sein. Analog zur obigen Untersu-

chung der Übertragbarkeit von EES-Werten müssen auch hier mindestens drei verschiedene Fälle unterschieden werden.

#### 4.1 Fall 1

Im ersten Szenario sind die Fahrzeuge aus dem Unfall und aus dem Versuch baugleich. Das auffahrende Unfallfahrzeug habe entgegen dem Crashfahrzeug nicht sein Leergewicht, sondern sei voll beladen. Unter diesen Voraussetzungen sind die Struktursteifigkeiten und bei gleichen Verformungstiefen folglich auch die Deformationsenergien im Crash und im Fall gleich. Dies gilt unabhängig von der Verformungscharakteristik.

In der Praxis wird man diesen Fall auch ansetzen, wenn (innerhalb vertretbarer Grenzen) unterschiedliche und bezüglich der Leermassen voneinander geringfügig abweichende Fahrzeuge im Fall und im Crash miteinander verglichen werden. Hierbei vernachlässigt man die unterschiedlichen Struktursteifigkeiten, mit welchen die Fahrzeuge aufgrund ihrer verschiedenen Massen konstruiert wurden. Die Gesamtdeformationsenergie aus dem Versuch lässt sich mit **GLEICHUNG (18)** beschreiben. Sie entspricht der Gesamtdeformationsenergie aus dem Fall. Nach Gleichsetzen und Umformen erhält man für die Relativgeschwindigkeit im Fall **GLEICHUNG (19)**.

Für ein Zahlenbeispiel haben die beiden Crashfahrzeuge und das gestoßene Fahrzeug im Fall eine Masse von 1000 kg. Das stoßende Fahrzeug im Fall ist 1500 kg schwer. Fuhr im Crash das stoßende Fahrzeug mit einer Relativgeschwindigkeit von 20 km/h auf, so muss dann unter den beschriebenen Voraussetzungen im realen Unfallgeschehen das auffahrende Fahrzeug mit einer Relativgeschwindigkeit von 18,3 km/h gegen den zweiten Pkw gestoßen sein.

Da im Fall die gleiche kinetische Energie wie im Crash in das System hineinfließt, ist für das schwerere stoßende Fahrzeug eine geringere Kollisionsgeschwindigkeit

erforderlich. Interessanterweise ist es unter diesen Voraussetzungen unerheblich, ob das auffahrende Fahr-

zeug oder das gestoßene Fahrzeug schwerer ist. Entscheidend ist die Gesamtdeformationsenergie.

Ein weiteres Beispiel zeigen die **BILDER 20 bis 23**. Hier sind die Ergebnisse aus zwei Crashversuchen gezeigt. Beim ersten Versuch wurden die Fahrzeuge leer und beim zweiten mit ihrem zulässigen Gesamtgewicht gecrasht. Vergleicht man die Schadenbilder, so sind die Deformationen an den Fahrzeugen des zweiten Versuches (**BILD 22 und BILD 23**) höher. In der Tat wurde im zweiten Versuch eine um 61 % höhere Deformationsenergie umgesetzt.

Die Relativgeschwindigkeiten waren bei den beiden Versuchen nahe-

$$E_{defC} = \frac{1 - k_C^2}{2} \cdot \frac{m_{1C} \cdot m_{2C}}{m_{1C} + m_{2C}} \cdot v_{relC}^2 \quad \text{Gl. (18)}$$

$$v_{relF} = v_{relC} \cdot \sqrt{\frac{\frac{m_{1C} \cdot m_{2C}}{m_{1C} + m_{2C}}}{\frac{m_{1F} \cdot m_{2F}}{m_{1F} + m_{2F}}}} \quad \text{Gl. (19)}$$



**BILD 20:** Hyundai Accent ( $m=958\text{ kg}$ ) und **BILD 21:** Opel Vectra ( $m=1230\text{ kg}$ );  
 $v=42,7\text{ km/h}$ ,  $k=0,21$ ; kinetische Eingangsenergie:  $67\text{ kNm}$ ; Gesamtdeformationsenergie:  $41\text{ kNm}$  ([4]: 16422)  
**FIGURE 20:** Hyundai Accent ( $m=958\text{ kg}$ ) and **FIGURE 21:** Opel Vectra ( $m=1230\text{ kg}$ );  
 $v=42.7\text{ km/h}$ ,  $k=0.21$ ; kinetic input energy:  $67\text{ kNm}$ ; total deformation energy:  $41\text{ kNm}$  ([4]: 16422)



**BILD 22:** Hyundai Accent ( $m=1452\text{ kg}$ ) und **BILD 23:** Opel Vectra ( $m=1716\text{ kg}$ );  
 $v=43,3\text{ km/h}$ ,  $k=0,15$ ; kinetische Eingangsenergie:  $105\text{ kNm}$ ; Gesamtdeformationsenergie:  $66\text{ kNm}$  ([4]: 16497)  
**FIGURE 22:** Hyundai Accent ( $m=1452\text{ kg}$ ) and **FIGURE 23:** Opel Vectra ( $m=1716\text{ kg}$ );  
 $v=43.3\text{ km/h}$ ,  $k=0.15$ ; kinetic input energy:  $105\text{ kNm}$ ; total deformation energy:  $66\text{ kNm}$  ([4]: 16497)



**BILD 24:** Volkswagen Passat ( $m=1440$  kg) und **BILD 25:** Opel Vectra ( $m=1685$  kg);  $v=41,8$  km/h,  $k=0,14$ ;  
kinetische Eingangsenergie: 97 kNm, Gesamtdeformationsenergie: 61 kNm

**FIGURE 24:** Volkswagen Passat ( $m=1440$  kg) and **FIGURE 25:** Opel Vectra ( $m=1685$  kg);  $v=41.8$  km/h,  $k=0.14$ ;  
kinetic input energy: 97 kNm, total deformation energy: 61 kNm

zu identisch. Aufgrund der höheren Masse des auffahrenden Pkw lag jedoch die kinetische Eingangsenergie beim zweiten Versuch 57% über der des ersten Versuchs. Um gleiche Schäden hervorzurufen, hätte die Relativgeschwindigkeit beim zweiten Versuch nach Gleichung 19 nur 35,5 km/h betragen müssen.

Beim nächsten Versuch, der in **BILD 24** und **BILD 25** dargestellt ist, lagen prinzipiell die gleichen Parameter (Geschwindigkeit und Fahrzeugmassen) wie beim Versuch in Bild 22 und 23 vor. Abweichend dazu wurde bei dem auffahrenden Fahrzeug ein Pkw verwendet, der bereits mit seinem Leergewicht das zulässige Gesamtgewicht des Pkw in Bild 22 erreicht. Die Front des Volkswagen Passat muss folglich gegenüber der Frontstruktur des Hyundai deutlich steifer ausgelegt sein. Dies spiegelt sich auch in den Versuchsergebnissen wider. Die Schäden beim auffahrenden Passat, Bild 24, fallen im Vergleich zum Hyundai (Bild 22) sichtbar geringer aus.

Dagegen sind die Schäden an den gestoßenen Fahrzeugen ähnlich. Aufgrund der stärker abgerundeten Frontkontur des Passat ist der gestoßene Opel Vectra etwas stärker in der Fahrzeugmitte beschädigt als der vom Hyundai Accent beaufschlagte

Opel Vectra. Dieser ist wiederum im Außenbereich stärker deformiert, was die größere Spaltmaßveränderung an den Fondtüren zeigt.

Im Ergebnis ist jedoch der vom Volkswagen Passat angestoßene Opel Vectra stärker beschädigt als das vom Hyundai angestoßene Pendant. Wären die Schäden gleich, so müsste – da die Gesamtdeformationsenergie in den Versuchen 16497 und 16580 nahezu übereinstimmt – auch die vom Volkswagen Passat aufgenommene Deformationsenergie gleich der des Hyundai sein. Hieraus würden bei gleichem Kraftniveau (was Voraussetzung für gleiche Schäden an den beiden Opel Vectra ist) wiederum gleiche Verformungstiefen am Volkswagen Passat und am Hyundai folgen. Das ist sichtlich nicht der Fall (siehe Bild 22 und Bild 24). Somit erfolgt im Versuch 16580 die Aufteilung der Deformationsenergie aufgrund der höheren Steifigkeit des Volkswagen Passat (erwartungsgemäß) zulasten des gestoßenen Opel Vectra.

#### 4.2 Fall 2

Nachfolgend soll untersucht werden, welche Zusammenhänge bestehen, wenn im Crash zum Beispiel zwei leermassengleiche Fahrzeuge aufeinanderfahren und im Fall die Leermas-

se des auffahrenden Pkw abweicht. Weiterhin habe das stoßende Fahrzeug im Fall analog zu Abschnitt 3.2 aufgrund der höheren Leermasse eine andere Struktursteifigkeit (vergleiche auch letztes Versuchsbeispiel des vorherigen Abschnitts). Es gelte nach wie vor die Prämisse, dass die Schadenbilder im Crash und im Fall vergleichbar sind.

Unter diesen Voraussetzungen sind die Verformungstiefen, nicht aber die Struktursteifigkeiten und damit auch nicht die Deformationsenergien im Crash und im Fall gleich. Es kann folglich nicht einfach wie unter 4.1 die Gesamtdeformationsenergie aus dem Versuch mit derjenigen aus dem Fall gleichgesetzt werden. Allerdings sind nach Gleichung 10 die EES-Werte der Crashfahrzeuge direkt für die Unfallfahrzeuge – jeweils auf die Leermassen bezogen – verwendbar. Man kann also mithilfe der EES-Werte aus dem Versuch unter Berücksichtigung der Massen der real verunfallten Fahrzeuge nach Gleichung 1 die Relativgeschwindigkeit im Fall berechnen.

Die Aufteilung der Gesamtdeformationsenergie auf die beiden Versuchsfahrzeuge, also die Bestimmung der Einzel-EES-Werte, ist bei einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision jedoch nicht ohne Weiteres möglich. Insofern

muss im Gegensatz zur 4.1 zumindest ein EES-Wert der Versuchsfahrzeuge bekannt sein.

Da sich die Gesamtdeformationsenergie aus Gleichung 18 ergibt, kann dann der zweite EES-Wert nach **GLEICHUNG (20)** für den Versuch und damit für den Fall berechnet werden. Die Stoßzahl  $k$  ist ebenfalls aus dem Versuch bekannt.

Letztlich ist zu erkennen, dass der hier betrachtete Fall 2 nicht allein auf der Ebene eines Fahrzeug-Fahrzeug-Versuchs zu lösen ist. Es wird auch ein EES-Wert aus einem Barrierenanprallversuch benötigt.

### 4.3 Fall 3

Betrachtet man analog zu 3.3 Fahrzeuge mit nicht linearer Auslegung (das heißt mit rechteckiger Kraft-Weg-Kennung bei leichten Fahrzeugen oder abgeknickter Kennung bei schweren Fahrzeugen) und möchte die Ergebnisse eines Fahrzeug-Fahrzeug-Crashtests auf den realen Unfall übertragen, so muss zunächst analysiert werden, welche der beteiligten Fahrzeuge wie ausgelegt sind.

Abgesehen davon dass in der Praxis oftmals die genaue Kennlinie eines Fahrzeugs nicht bekannt ist, muss bei Fahrzeugen mit inhomogener Kennlinie auch das Geschwindigkeitsniveau beim Vergleich mit Crashversuchen hinreichend berücksichtigt werden (vergleiche Bild 18).

Aufgrund dieser vielfältigen Parameter, die bei Fahrzeugen mit besonderen Kennlinien beachtet werden müssen, erscheint es an dieser Stelle nicht sinnvoll, Formelzusammenhänge für die Übertragung der Relativgeschwindigkeit vom Crash auf den Unfall zu entwickeln. In derartigen Fällen empfiehlt es sich, geeignete EES-Versuche auf dem entsprechenden Geschwindigkeitsniveau heranzuziehen und mit diesen die einzelnen EES-Werte zu bestimmen.

### 5 Fazit

Bei der Übertragung von Versuchsergebnissen auf einen realen Unfall

$$EES_{2C} = \sqrt{\frac{1}{m_{2C}} (2E_{DefgesC} - m_{1C} EES_{1C}^2)} \quad \text{Gl. (20)}$$

steht man oftmals vor der Frage, inwiefern sich abweichende Leermassen und Beladungen bei Versuch und Fall auswirken und wie die Abweichungen gegebenenfalls zu kompensieren sind.

Der vorliegende Artikel leitet die hierfür notwendigen Zusammenhänge her. Dabei wird auf die Übertragung von EES-Werten aus Barrierenanprallversuchen ebenso eingegangen wie auf Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen, bei denen direkt aus der Relativgeschwindigkeit der Versuchsfahrzeuge auf die Relativgeschwindigkeit der real verunfallten Fahrzeuge geschlossen werden kann.

Die Ausarbeitung zeigt, dass zunächst grundsätzlich festgestellt werden muss, von welchen Prämissen im Hinblick auf die Struktursteifigkeit der zu vergleichenden Fahrzeuge auszugehen ist. Im einfachsten Fall sind die Struktursteifigkeit des Versuchsfahrzeugs und die des Unfallfahrzeugs identisch; lediglich die Beladungen und damit die Unfallmasse sind unterschiedlich. In den überwiegenden Fällen wird jedoch das Unfallfahrzeug aufgrund einer anderen Leermasse auch eine vom Crashfahrzeug abweichende Struktursteifigkeit besitzen. Der Unterschied ergibt sich aus der Auslegung der Fahrzeuge für die genormten Barrierentests, die zu einer Massenproportionalität der Steifigkeit führt. Moderne Fahrzeuge haben ferner aus Kompatibilitätsgründen von der konventionellen, linearen Kennlinie abweichende Verformungscharakteristika.

Nachdem die Steifigkeitseigenschaften der Fahrzeuge eingeordnet wurden, können die hergeleiteten Zusammenhänge angewandt und damit die EES-Werte oder die Relativgeschwindigkeit auf den realen Fall übertragen werden. Dabei ist bei vergleichbar struktursteifen Fahrzeugen

bei der Übertragung von EES-Werten ein Massenfaktor zu berücksichtigen. Bei Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen mit vergleichbaren Verformungstiefen kann die Gesamtdeformationsenergie gleichgesetzt werden.

Bei massenproportionaler Auslegung lässt sich der EES-Wert aus dem Versuch direkt auf den Fall übertragen. Dies gilt auch bei Fahrzeug-Fahrzeug-Versuchen. Da dort, das heißt aus dem Crashtest mit zwei Fahrzeugen, jedoch die EES-Werte nicht unmittelbar vorliegen, muss zusätzlich zu der sich aus dem Versuch ergebenden Relativgeschwindigkeit zumindest ein EES-Wert bekannt sein.

Die Ergebnisse sind in der **TABELLE 1** noch einmal als Arbeitshilfe zusammengefasst.

### Literaturhinweise

- [1] Kalthoff, W.; Becke, M.: Die Stoßzahl bei Auffahrkollisionen. Ein wesentlicher Parameter zur Bestimmung der HWS-Belastung, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 10/2000
- [2] Kalthoff, Wolfram: Die Stoßzahl bei Heckauffahrkollisionen – Neue Erkenntnisse, Vortrag 17. EVU-Jahrestagung, Nizza, 2008
- [3] Becke, M.: Probleme und Fehler bei der EES-Einstufung, Vortrag 5. Europäische Fachtagung für Unfallrekonstruktion, Wildhaus, 2003
- [4] www.crashtest-service.com
- [5] Kramer, Florian: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Vieweg Verlag, ATZ-MTZ-Fachbuch, Wiesbaden, 1998
- [6] Gabler, H. C and Hollowell, W. T.: NHTSA's vehicle aggressivity and compatibility research program, Proceedings of the Sixteenth International Conference on Enhanced Safety of Vehicles, Paper No. 98-S3-O-01, Windsor, Canada, June 1998
- [7] Bangeman, Chr., Schueler, F., Wech, L.: Interdisziplinäre Herausforderung: Kompatibilität im Car-to-Car-Crash, crash.tech 2003, Nürnberg, Mai 2003
- [8] www.nhtsa.gov
- [9] Koob, Jean-Pierre: Vergleich moderner Unfallrekonstruktionsverfahren für Pkw-Pkw-Kollisionen, Luxemburg, 1988

TABELLE 1: Zusammenfassung der Ergebnisse  
 TABLE 1: Summary of results

EES	Masse	Steifigkeit	Verformung	Deformations-energie	EES	Berechnung EES <sub>F</sub>
<b>(3.1) Gleiche Fahrzeuge, unterschiedliche Beladung</b>						
	$m_F \neq m_C$	$c_F = c_C$	$s_F = s_C$	$E_F = E_C$	$EES_F \neq EES_C$	$EES_F = \sqrt{\frac{m_C}{m_F}} \cdot EES_C$
<b>(3.2) Unterschiedliche Fahrzeuge, massenproportionale Steifigkeit, lineare / lineare oder nicht lineare / nicht lineare Kennung</b>						
	$m_F \neq m_C$	$c_F \neq c_C$	$s_F = s_C$	$E_F \neq E_C$	$EES_F = EES_C$	$EES_F = EES_C$
Relative-schwindigkeit	Masse	Steifigkeit	Verformung	Deformations-energie / EES	Gesamtdeformationsenergie	Berechnung v <sub>rel</sub>
<b>(4.1) Gleiche Fahrzeuge, unterschiedliche Beladung</b>						
	$m_{F1} = \text{oder} \neq m_{C1}$	$c_{F1} = c_{C1}$	$s_{F1} = s_{C1}$	$E_{F1} = E_{C1}$	$E_{Fges} = E_{Cges}$	$v_{relF} = v_{relC} \cdot \sqrt{\frac{m_{1C} \cdot m_{2C}}{m_{1C} + m_{2C}} \cdot \frac{m_{1F} \cdot m_{2F}}{m_{1F} + m_{2F}}}$
	$m_{F2} = \text{oder} \neq m_{C2}$	$c_{F2} = c_{C2}$	$s_{F2} = s_{C2}$	$E_{F2} = E_{C2}$		
<b>(4.2) Unterschiedliche Fahrzeuge, massenproportionale Steifigkeit, lineare / lineare oder nicht lineare / nicht lineare Kennung</b>						
	$m_{F1} = \text{oder} \neq m_{C1}$	$c_{F1} = \text{oder} \neq c_{C1}$	$s_{F1} = s_{C1}$	$E_{F1} \neq E_{C1}$ $E_{F2} \neq E_{C2}$ $EES_{F1} = EES_{C1}$	$E_{Fges} \neq E_{Cges}$	1. EES-Wert aus Versuch auf Fall übertragen; 2. EES-Wert aus $E_{Defges} \Rightarrow v_{rel}$ berechnen
	$m_{F2} = \text{oder} \neq m_{C2}$	$c_{F2} = \text{oder} \neq c_{C2}$	$s_{F2} = s_{C2}$	$EES_{F2} = EES_{C2}$		
<b>(4.3) Unterschiedliche Fahrzeuge, massenproportionale Steifigkeit, lineare und nicht lineare Kennung gemischt oder unbekannt</b>						
	$m_{F1} = \text{oder} \neq m_{C1}$	$c_{F1} = \text{oder} \neq c_{C1}$	$s_{F1} = s_{C1}$	$E_{F1} \neq E_{C1}$ $E_{F2} \neq E_{C2}$ $EES_{F1} \neq EES_{C1}$	$E_{Fges} \neq E_{Cges}$	Beide EES-Werte aus Barrieren-Versuchen, $\Rightarrow v_{rel}$ berechnen
	$m_{F2} = \text{oder} \neq m_{C2}$	$c_{F2} = \text{oder} \neq c_{C2}$	$s_{F2} = s_{C2}$	$EES_{F2} \neq EES_{C2}$		

**The use of crash test results for different accident and test vehicle masses**

The results of collision tests are an important aid for the reconstruction of traffic accidents. In practice, however, the test results cannot always be applied one to one to the concrete case. This article describes what needs to be taken into consideration when using crash test results for different accident and test vehicle masses. The present article is an expanded version of the paper presented at the EVU conference in Brasov in 2012 under the title "Specific aspects of the use of crash tests for the reconstruction of traffic accidents".

**\* Autoren**

Dipl.-Ing. Wolfram Kalthoff ist ö. b. u. v. Sachverständiger und Geschäftsführer bei CTS in Münster.  
 Dipl.-Ing. Ralf Bührmann ist Versuchsleiter bei CTS in Münster.  
 Dr.-Ing. Bernd Fago ist ö. b. u. v. Sachverständiger bei S+B in Münster. ::

