

Verstärkung geschlossener Profile zur Verbesserung der Crasheigenschaften von Karosseriestrukturen

C. Brüggemann, P. Horst

Institut für Flugzeugbau und Leichtbau der Technische Universität Braunschweig, Deutschland

U. Eilert

Institut für Werkstoffe der Technischen Universität Braunschweig, Deutschland

Abstract:

The reinforcements of door sills are investigated using both numerical simulations and structural tests. The examinations are based on a test configuration similar to the EuroNCAP pole test which allows to cover the effects of local reinforcements on the crash behaviour of the body in white. Component tests are carried out on a special test rig simulating the surrounding structure of the vehicle. As specimens closed steel profiles reinforced with polyurethane foam are used. A numerical model is verified in a corresponding scenario by using the finite element method. Finally the numerical model is implemented into a vehicle model and the effects of local reinforcements on the body in white behaviour are evaluated. These analyses proof a potential benefit of such measures.

Keywords:

Crash, Karosserie, Pfahltest, Schweller

1 Einleitung

Bis vor kurzem standen vor allem verbesserte Sicherheit, höhere Fahrleistungen und Komfort im Fokus der Fahrzeugentwicklung. Derzeit rücken zusätzlich Forderungen nach deutlicher Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen in den Blickpunkt. Damit gewinnt auch der Leichtbau an Bedeutung.

Die steigende Anzahl der am Markt erhältlichen Fahrzeugvarianten hat ebenfalls Einfluss auf die Fahrzeugentwicklung: Da die Zahl der insgesamt verkauften Fahrzeuge nicht im gleichem Maße steigt wie die Zahl der Varianten, sinkt die Stückzahl je Variante. Dies hat eine Steigerung der Kosten zur Folge. Eine mögliche Antwort darauf ist die Weiterentwicklung von modularen Karosseriekonzepten [1].

Verstärkungsmaßnahmen für Karosseriestrukturen, die sowohl gewichtseffiziente Konstruktionen ermöglichen als auch die Möglichkeit einer flexiblen Anpassung der mechanischen Eigenschaften in Entwicklung und Produktion an verschiedene Fahrzeugderivate bieten, gewinnen so an Bedeutung.

Bei der Auslegung von Karosserien sind neben Steifigkeits- und Festigkeitsgesichtspunkten vor allem Crashlastfälle zu beachten. So stellt u. a. der Pfahlaufprall nach EuroNCAP [2] hohe Anforderungen an die Karosseriestruktur: Das Fahrzeug trifft, auf einen Schlitten bewegt, mit einer Geschwindigkeit von 29 km/h seitlich auf einen starren Pfahl auf (Bild 1). Nach [3] sind die Intrusionen der Fahrgastzelle gering zu halten, um den Überlebensraum für die Insassen sicherzustellen. Zusätzlich sind die auftretenden Beschleunigungen zu begrenzen.

Der Lasteintrag in die Karosserie findet bei dem Pfahltest sehr lokal statt. Die Last wird hauptsächlich über den Schweller, den Seitenaufprallschutz in der Tür und den Dachrahmen in die Karosserie eingeleitet. Dem weit außen liegenden Schweller kommt dabei eine besondere Rolle zu. Er wird sowohl an der A- als auch B-Säule abgestützt und kann die eingeleiteten Lasten außerdem über den Boden und den Sitzquerträger weiterleiten. In Bild 2 ist das Deformationsverhalten von Schweller und Boden dargestellt.

Eine Vergrößerung des Überlebensraums lässt sich durch die Reduzierung der Pfahlintrusion erzielen. Dazu ist es notwendig, das sehr ausgeprägte lokale Verhalten durch geeignete Verstärkungsmaßnahmen so zu verändern, dass die Lastübertragung und Energieabsorption in einem größeren Bereich vonstatten geht. Die Verzögerungen sollten so abgestimmt sein, dass sich für die Insassen keine höheren Belastungen ergeben.

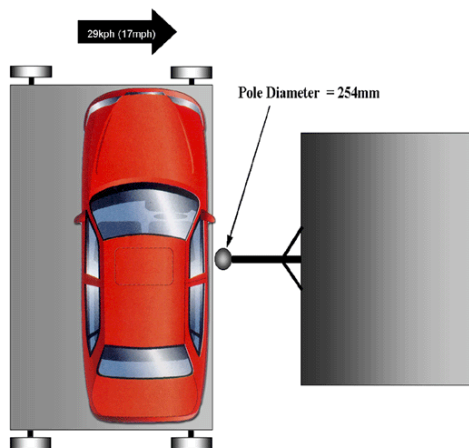


Bild 1: Pfahltest nach EuroNCAP [2]



Bild 2: Deformation der Bodenstruktur eines Fahrzeugs

2 Vorgehen

Die Untersuchung unterschiedlicher Profilverstärkungen erfolgt anhand von schwellerähnlichen Profilen. Dabei handelt es sich um abgekantete U-Profile aus Stahl unterschiedlicher Güte, die durch ein Deckblech geschlossen werden. Als Fügeverfahren kommt das Laserstrahlschweißen zum Einsatz. Die Biegesteifigkeiten der Versuchskörper entsprechen denen eines im A-Segment verwendeten Schwellers. Die zu untersuchenden Verstärkungsmaßnahmen werden nachträglich in die bereits verschweißten Profile eingebracht.

Untersucht werden die Versuchskörper anhand eines Komponententests, der die Effekte, die durch den Einbau des Schwellers im Fahrzeug entstehen, abbilden soll. Um die Komplexität der Tests zu reduzieren, werden die Versuche zunächst quasistatisch durchgeführt. Begleitend erfolgt ein Abgleich mit den Ergebnissen von Simulationen mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM). Die dabei gewonnenen Erkenntnisse finden Eingang bei der Implementierung der Verstärkungsmaßnahmen in ein FEM-Fahrzeugmodell, mit dem Aussagen bzgl. der Rückwirkungen auf die Karosseriestruktur getroffen werden können.

3 Ableitung des Komponententests

In einem ersten Schritt werden die Profile in einem Dreipunkt-Biegeversuch einer reinen Biegebelastung ausgesetzt. Die Durchmesser der Auflager und des Impaktors des Versuchstandes entsprechen dem Durchmesser des Pfahls nach EuroNCAP und der Auflagerabstand der Länge eines Fahrzeugschwellers.



Bild 3: Versuchsaufbau für den Komponententest am Institut für Werkstoffe

Erweitert wird der Versuchsaufbau durch zwei seitlich angebrachte Zylinder (Bild 3), durch die zusätzlich eine Längskraft auf das Profil aufgebracht wird. Die Größe der Längskraft wird so gewählt, dass sich für ein unverstärktes Referenzprofil das gleiche Deformationsbild einstellt wie für einen Schweller im Gesamtfahrzeugcrash. Dazu wird ein am Dreipunkt-Biegeversuch (Bild 4) validiertes FEM-Modell herangezogen, das durch seitliche Längskräfte ergänzt wird. Die Größe dieser Kräfte wird in einem iterativen Prozess so lange angepasst, bis sich ein dem Gesamtfahrzeugcrash entsprechendes Deformationsbild einstellt (Bild 5).

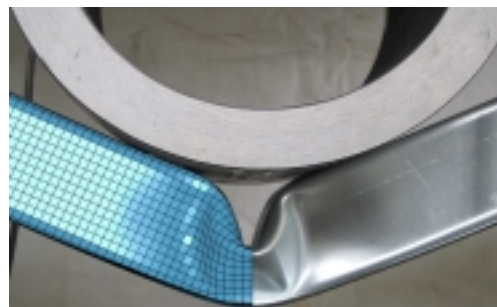
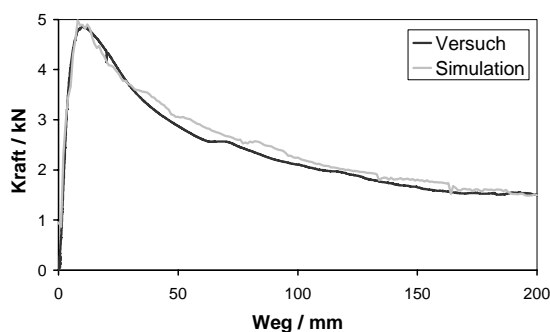


Bild 4: Vergleich von Simulation und Versuch am Dreipunkt-Biegetest

Die Simulation des Komponententests wird an einem Viertelmodell des Profils durchgeführt. Den verwendeten Schalenelementen wird das Werkstoffmodell *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY und eine entsprechende Verfestigungskurve des Werkstoffs zugeordnet. Der Kaltverfestigung durch den Abkantprozess wird durch eine entsprechend modifizierte Verfestigungskurve im Bereich der Biegeradien Rechnung getragen.

Auflager und Impaktor werden ebenso wie die Kopplungspunkte zur seitlichen Zylinderanbindung als Starrkörper angenommen. Während Auflager und Impaktor mit Hilfe von Schalenelementen

diskretisiert werden, geschieht dies bei den Kopplungspunkten über Volumenelemente. Diese sind über einen festen Kontakt mit den Schalenelementen des Profils verbunden. Die Längskraft wird über einen dem Starrkörper zugehörigen Knoten eingeleitet und ist auf einen raumfesten Punkt gerichtet. Die Deformation des Profils erfolgt über eine Verschiebung des Impaktors.



Bild 5: Bestimmung der benötigten Längskraft

4 Untersuchung von Verstärkungsmaßnahmen

Die zu untersuchenden Verstärkungsmaßnahmen werden entsprechend den Möglichkeiten, die sich fertigungstechnisch bieten, in das Profil eingebracht. Im Fall von Polyurethanschaum wäre dies z.B. das Einspritzen von zwei Komponenten, die im Profil aufschäumen und sich fest mit den KTL-beschichteten Karosserieblechen verbinden. Bislang wurde jedoch nur der Fall eines ausgehärteten Schaumkerns, der in ein unbeschichtetes Profil aus DP600 eingeschoben wurde, experimentell untersucht.

Die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens des verwendeten Schaums erfolgt anhand von Druck- und Zugversuchen an Rundproben. Die Kraft-Weg-Kurve der Druckversuche zeigt einen für poröse Werkstoffe charakteristischen Verlauf: Nach einem „elastischen“ Bereich mit linearem Kraftanstieg wird über einen weiten Bereich ein nahezu konstantes Kraftniveau gehalten, bevor die Verdichtung des Materials zu einem erneuten Anstieg der Kraft führt (Bild 6).

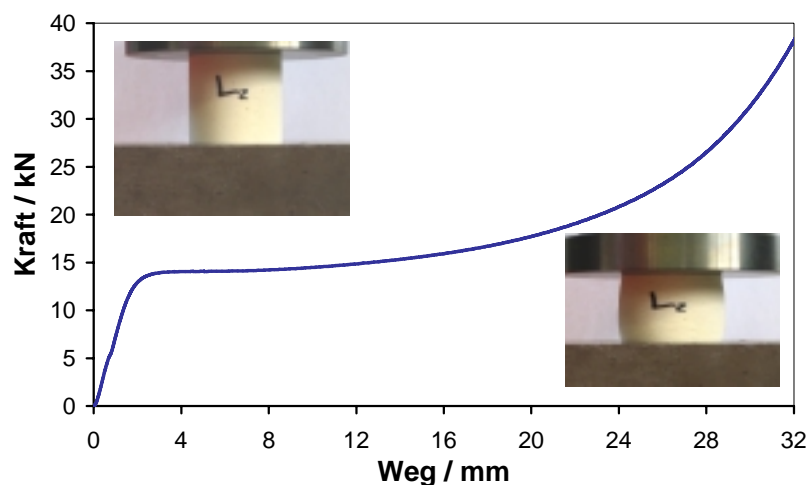


Bild 6: Charakterisierung des Werkstoffverhaltens von Polyurethanschaum anhand von Druckversuchen

Die Berücksichtigung des Schaums in der Simulation des Komponententests erfolgt durch das zusätzliche Einbinden von Volumenelementen in das Viertelmodell. Als Werkstoffmodell findet das isotrope Schaummodell *MAT_CRUSHABLE_FOAM [4] mit einer aus den Druckversuchen abgeleiteten Fließkurve Verwendung. Der Übergang zwischen Schaum und Profil wird im Fall des eingeschobenen Schaumkerns über einen Flächenkontakt realisiert. Dem Fall eines direkt im Profil aufgeschäumten Schaumkerns, der eine feste Verbindung mit der KTL-Beschichtung des Profils eingeht, entspricht hingegen eher die Modellierung eines festen Flächenkontakts.

5 Erste Ergebnisse des Komponententests

Im Komponententest zeigt das unverstärkte Profil ein dem Gesamtfahrzeugcrash entsprechendes Deformationsverhalten: Im Gegensatz zum Dreipunkt-Biegeversuch, bei dem das Profil im Bereich des Impaktors lokal ausbeult und plastifiziert, wird es im Komponententest zusammengedrückt und schmiegt sich an den Impaktor an (Bild 7). Der Kraft-Weg-Verlauf weist keinen Kraftabfall wie im Dreipunkt-Biegeversuch, sondern einen kontinuierlichen Anstieg auf.

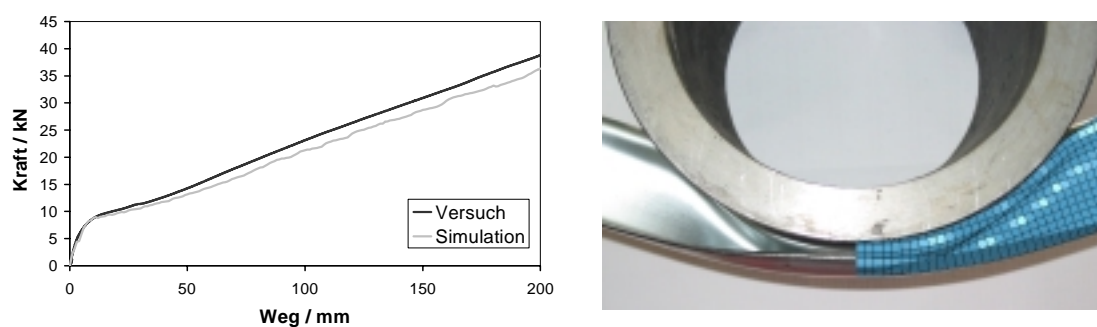


Bild 7: Vergleich von Simulation und Versuch am Komponententest

Der Einsatz eines eingeschobenen Polyurethanschaumkerns führt zu einem deutlich anderen Deformationsverhalten. Das Profil legt sich zwar weiterhin an den Impaktor an, wird jedoch nicht mehr zusammengedrückt, sondern behält seine Ausgangshöhe (Bild 8). Ein Blick in das aufgeschnittene Profil zeigt, dass der Schaumkern an der Stahloberfläche abgleitet und sich von der Zugseite her senkrecht Risse ausbilden. Durch den Einsatz von *MAT_ADD_EROSION lassen sich diese auch in der Simulation nachbilden. Der Kraft-Weg-Verlauf (Bild 9) gleicht qualitativ dem eines unverstärkten Profils im Komponententest. Das Kraftniveau liegt jedoch ungefähr 30 % höher. Simulationen, in denen eine feste Verbindung zwischen Schaum und Profil angenommen wird, zeigen eine weitere Erhöhung des Kraftniveaus.



Bild 8: Mit einem eingeschobenen Kern aus Polyurethanschaum versehenes Profil aus DP600 nach dem Komponententest in Draufsicht (links) und im Schnitt, jeweils mit Überlagerung des Simulationsergebnisses.

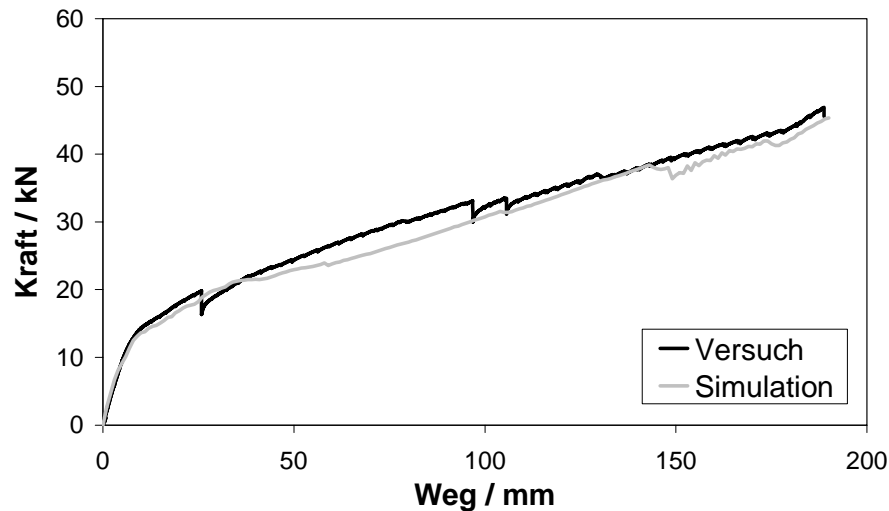


Bild 9: Kraft-Weg-Verlauf eines mit eingeschobenem Kern aus Polyurethanschaum versehenen Profils aus DP600 im Komponententest

6 Implementierung der Modellierung in ein Fahrzeugmodell

Mit Hilfe des Komponententests kann die Wirkung von Verstärkungsmaßnahmen auf das Deformationsverhalten von Schwellerprofilen sowohl experimentell als auch numerisch effektiv untersucht werden. Um zusätzlich Aussagen über mögliche Rückwirkungen auf die übrige Karosseriestruktur treffen zu können, wird die an den Komponententestversuchen validierte Modellierung des mit Polyurethanschaum verstärkten Profils in das FEM-Modell einer modular aufgebauten Karosseriestruktur eines Fahrzeugs des A-Segments [5] übernommen (Bild 10). Dazu wird die Größe der Volumenelemente entsprechend der im Fahrzeugmodell verwendeten Elementgröße angepasst. Die Verbindung zwischen Schaum und Schweller erfolgt über einen festen Flächenkontakt. Zusätzlich wird das Modell mit einem Dummy [6] und einer Türinnenverkleidung auf der Fahrerseite aus Solidelementen versehen. Rückhaltesysteme werden nicht modelliert. Somit tritt der Dummy erstmals beim Auftreffen auf die Türinnenverkleidung mit der Fahrzeugstruktur in Interaktion.

Bild 11 zeigt den Verlauf der Intrusion während des Pfahlaufpralls für ein Fahrzeug mit verstärkten und unverstärkten Schweller. Im Vergleich zum Referenzfahrzeug mit unverstärkten Schweller bewirkt die Polyurethanschaumverstärkung eine Reduzierung der Eindringtiefe des Pfahls um ca. 15 %. Da der Dummy erst mit dem Auftreffen auf die Türinnenverkleidung verzögert wird, ändert sich die Belastung des Dummies im Beckenbereich nicht.

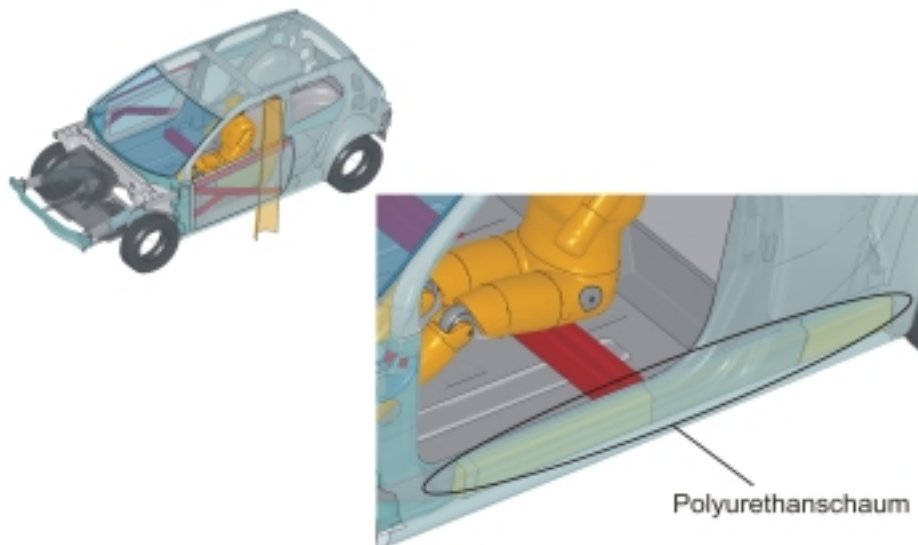


Bild 10: Positionierung des Polyurethanschaums im Fahrzeugmodell

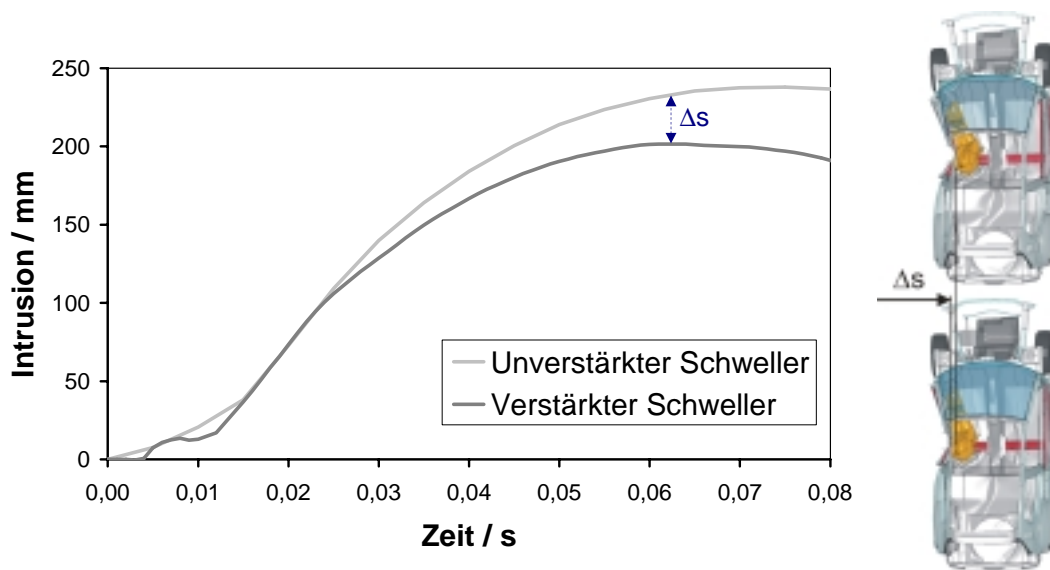


Bild 11: Auswirkung der Schwellerverstärkung auf die Intrusion

7 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Untersuchung von Schwellerprofilen im Pfahlcrash nach EuroNCAP wird ein Komponententest definiert, der den Einbaubedingungen in der Karosserie Rechnung trägt. Mit Hilfe dieses Komponententests werden Verstärkungsmaßnahmen für Schweller sowohl experimentell als auch numerisch untersucht. Bei der vorgestellten Verstärkungsmaßnahme handelt es sich um Polyurethanschaum. Versuch und Simulation zeigen bei einem teilweise mit Polyurethanschaum gefüllten Prüfkörper ein deutlich erhöhtes ertragbares Biegemoment. Die in der Simulation genutzte Modellierung des Komponententests wird auf das Crashmodell eines Fahrzeugs übertragen. Die Simulationen zeigen hier eine Reduzierung der Pfahlintrusion.

Weitere Untersuchungen werden mit unterschiedlichen Werkstoffgütern für die Versuchskörper und andersartigen Verstärkungsmaßnahmen durchgeführt, wie z.B. mit APM-Aluminiumschaumkugeln und Kunststoffeinlegern. Als Referenz werden mit Stahlschotts versehene Profile herangezogen.

8 Literatur

- [1] Brüggemann, C.; Horst, P.; Eilert, U.; Rösler, J.; Kleinpeter, B.; Dilger, K.; Stieg, J.: Ein Ansatz zur Modularisierung von Karosseriestrukturen. Automobiltechnische Zeitschrift, ATZ Nr. 10, 2006
- [2] www.euroncap.com/content/test_procedures/pole_test.php, April 2007
- [3] Seiffert, U.: Fahrzeugsicherheit: Personenwagen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992
- [4] Hallquist, J. O.: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2005
- [5] Eilert, U.; Brüggemann, C.; Stieg, J.: Ergebnisbericht des Gemeinschaftsforschungsprojektes "Faszination Karosseriebau". Faszination Automobilmodularisierung, Bad Nauheim, 2006
- [6] Franz, U.; Stahlschmidt, S.; Keding, B.: Documentation FAT LS-DYNA ES-2 Model - Version 4.0. DYNAMore GmbH, 2007

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir der Volkswagen AG für die Beschaffung der Profile im Rahmen des Projekts „Faszination Karosseriebau“ und DOW Automotive für das Bereitstellen des Strukturschaums danken. Gedankt sei ebenfalls der DYNAMore GmbH für die Bereitstellung des Dummymodells.

