

Funktionsintegrierter Extremleichtbau in Sandwichbauweise

Michael Kriescher, Simon Brückmann

Einleitung

Die Notwendigkeit zur Reduktion von CO₂-Emissionen und Kraftstoffverbrauch führt zu Änderungen in der Konzeption zukünftiger Fahrzeuggenerationen. Dabei gibt es grundsätzlich zwei Entwicklungsrichtungen, nämlich die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und die Entwicklung von im Idealfall emissionsfreien, aber zumindest emissionsarmen Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang. In beiden Fällen spielt eine möglichst geringe Fahrzeugmasse eine wesentliche Rolle. Im NEFZ-Fahrzyklus machen Rollwiderstand und Beschleunigungswiderstand, die beide direkt vom der Fahrzeugmasse abhängen, rund zwei Drittel des gesamten Fahrwiderstandes aus (Abbildung 1).

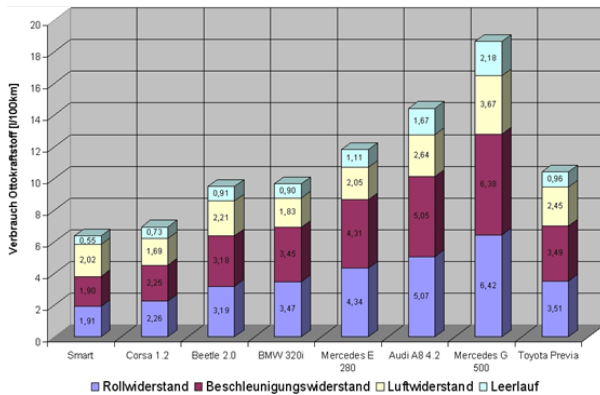


Abbildung 1: Anteil verschiedener Fahrwiderstände im NEFZ [1]

Leichtbau im Bereich der Karosserie ist besonders wirkungsvoll. Die Karosserie hat mit ca. 30 % den größten Anteil an der Gesamtmasse [2]. Nutzlast und Karosseriemasse bestimmen außerdem die Dimensionierung, und damit die Masse vieler weiterer Fahrzeugkomponenten, wie z.B. Antriebsstrang, Fahrwerk und Bremsen, so dass Leichtbaumaßnahmen an der Karosserie zu Masseneinsparungen an diesen Komponenten führen. Besonders ausgeprägt ist dieser Zusammenhang bei elektrifizierten Fahrzeugkonzepten. Eine leichte Fahrzeugstruktur ermöglicht hier insbesondere eine kleinere Dimensionierung des Energiespeichers (beispielsweise Batterien oder Brennstoffzellen), was starke Auswirkungen auf die Anschaffungs- und Betriebskosten solcher Fahrzeuge hat. Es werden daher aktuell große Anstrengungen unternommen, um die Karosseriemasse solcher Fahrzeuge zu reduzieren. Bekannt ist beispielsweise die verstärkte Verwendung von CFK in den Fahrzeugen der i-Baureihen der BMW AG [3]. Aufgrund der hohen Herstellungskosten und der zum Teil schwierig zu beherrschenden Eigenschaften dieser Materialien, beispielsweise hinsichtlich Recycling o-

Funktionsintegrierter Extremleichtbau in Sandwichbauweise

der Schadenstoleranz, wird bei dem im Folgenden vorgestellten Karosseriekonzept, das mit dem „German High Tech Champion“ Preis der Fraunhofer Gesellschaft ausgezeichnet wurde, ein anderer Lösungsweg beschritten. Es werden unter Verwendung konventioneller Materialien neuartige Bauweisen verwendet, um zum einen eine wesentliche Masseneinsparung bei einem sehr guten Crashverhalten zu erzielen. Zum anderen soll die Verwendung weniger, wenig komplex geformter Bauteile eine Produktion mit geringen Investitionskosten ermöglichen. Die Karosseriestruktur wird in Aluminium-Sandwich-Bauweise ausgeführt, um diese Ziele zu erreichen. Der Sandwich-Aufbau ermöglicht die Verwendung weniger, großflächiger, einfach geformter Bauteile, die dennoch eine hohe Steifigkeit und Festigkeit besitzen. Die Verwendung von Sandwichbauteilen für den Fahrzeugbau ist beispielsweise bei Rennfahrzeugen bekannt [4]. In dieser Arbeit wird jedoch die Verwendung solcher Bauteile für die Fahrgastzelle eines Pkw untersucht, wobei insbesondere typische Crashlastfälle betrachtet werden.

Das Verhalten von Sandwichbauteilen im Crashfall ist durch die Stabilisierung der Bauteile durch den Sandwichkern in der Regel vorteilhaft. Sandwichstrukturen unterscheiden sich in Ihrem Crashverhalten allerdings deutlich von einschaligen Bauteilen. Die Auslegung der Karosserie im Crashfall ist daher ein wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Das Fahrzeugkonzept ist ein leichtes, zweisitziges Stadtfahrzeug, mit ca. 440 kg Gesamtgewicht. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h, die Reichweite liegt bei ca. 100 km.

Konzeption der Karosserie

Das Grundkonzept der Karosserie besteht im Wesentlichen aus drei Abschnitten, dem Vorderwagen, der Fahrgastzelle und der Heckstruktur. Es ist für ein zweisitziges Brennstoffzellenfahrzeug mit Elektroantrieb ausgelegt (Abbildung 2), lässt sich aber auch an ein anderes Antriebskonzept anpassen.

Die Karosseriestruktur selbst, ohne Türen und Klappen wiegt dabei nur 80 kg, das Gewicht des beladenen Fahrzeugs beträgt 438 kg. Als Material kommen größtenteils Aluminium-Sandwich-Bauteile zum Einsatz.

Funktionsintegrierter Extreleichtbau in Sandwichbauweise

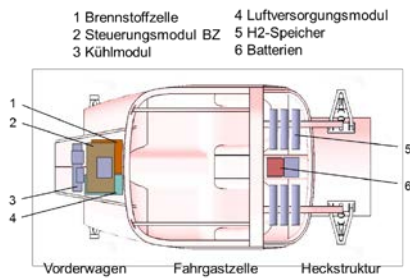


Abbildung 2: Aufteilung der Fahrzeugstruktur und Komponenten

Aufbau und Crashverhalten der Fahrgastzelle

Das Ziel der Entwicklung der Fahrgastzelle ist eine hohe passive Sicherheit bei gleichzeitig möglichst geringem Gewicht. Um dieses Ziel zu erreichen wird die Fahrgastzelle vollständig in Sandwichbauweise aus großflächigen Bauteilen ausgeführt, und ähnelt somit der Monocoque-Struktur eines Rennfahrzeugs. Zudem wird ein neuartiges Konzept für die Deformation der Fahrgastzelle im Crashfall verfolgt, das im Folgenden näher beschrieben wird.

Karosserien nach dem Stand der Technik sind in der Regel in Schalenbauweise ausgeführt, was einen guten Kompromiss aus Herstellkosten, hoher Steifigkeit und relativ geringem Gewicht ermöglicht [5]. Nachteilig ist bei solchen Strukturen jedoch, dass sie bei lokaler Lasteinleitung, oder aber bei Überlastung zum Beulen neigen, das in der Regel zu einem katastrophalen Kollabieren der Struktur führt. Um dies zu verhindern, wird eine Fahrgastzelle nach dem Stand der Technik sehr steif ausgeführt, was zu zusätzlichen Verstärkungen, bzw. relativ hohen Wandstärken führt.

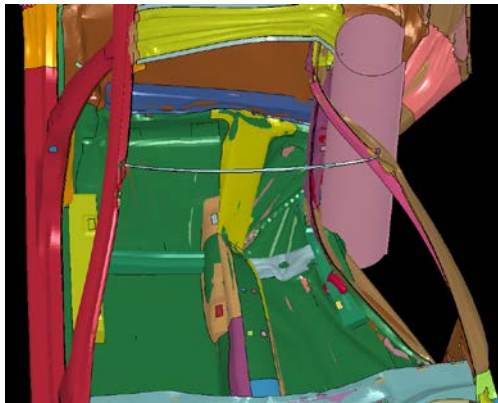


Abbildung 3: konventionelle Fahrzeugstruktur bei einem Pfahlcrash [6]

Sandwichstrukturen bieten hier Vorteile, da der Sandwichkern das Kollabieren der Struktur verhindern, bzw. verzögern kann.

Voruntersuchungen an mit Kernen gefüllten Stahlträgern haben gezeigt, dass ein gefüllter Träger, bei einer 3-Punkt-Biegebelastung ca. 6 Mal mehr Energie absorbiert, als ein Hohlprofil. Daraus ergibt sich gewichtsspezifisch immer noch eine 3-fach höhere Energieabsorption [7]. Die hohe Energieabsorption ist durch den Deformationsmechanismus eines solchen Trägers zu erklären. Durch den Kern wird ein Kollabieren des Trägerquerschnittes verhindert, wodurch die Rückseite des Trägers großflächig

Funktionsintegrierter Extremleichtbau in Sandwichbauweise

gedehnt wird. Durch diese Dehnung wird vergleichsweise viel Energie absorbiert. Dieses Prinzip kann zu einem ringförmigen Rahmen erweitert werden. Dabei tritt die Dehnung nicht nur lokal an der Kontaktstelle des Pfahls auf, sondern verteilt sich über die gesamte Struktur (Abbildung 4). Das Konzept ist bei der Karosseriestruktur durch einen ringförmigen, mit einem Kern versehenen Rahmen umgesetzt (Abbildung 5). Der Ausdruck „ringförmig“ bedeutet dabei, dass der Rahmen an jeder Stelle krümmungsstetig ausgeführt ist, es also keine Ecken oder plötzliche Änderungen des Verlaufs gibt. Nur dadurch ist eine Verteilung der Dehnung, nach dem oben beschriebenen Prinzip möglich. Auch die Bodenschale sowie die Stirn- bzw. Rückwand sind in Sandwichbauweise ausgeführt und sind mit dem Rahmen großflächig zu einer Einheit verbunden. Dadurch können sowohl die Lasten aus Seiten- und Pfahlcrash als auch die aus Vorderwagen und Heck weitergegebenen Kräfte möglichst großflächig verteilt werden.

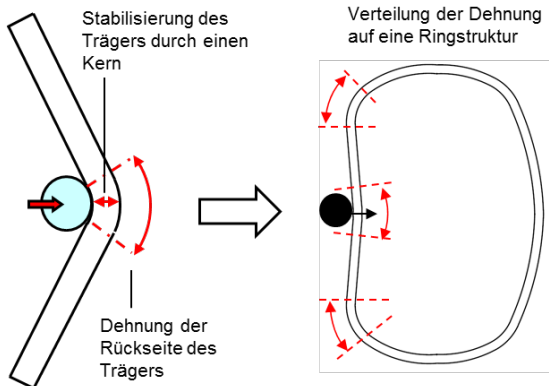


Abbildung 4: Prinzip der Energieabsorption beim Pfahlcrash

Ein Beispiel für die Funktionsweise dieser Struktur ist der Pfahlcrash. Die LS-Dyna-Simulation zeigt eine Deformation von Ring und Seitenwand, ohne dass es zu lokalem Kollabieren oder Knicken kommt (Abbildung 6). Die durch die Intrusion des Pfahls erzeugte Dehnung verteilt sich über einen großen Bereich von Rahmen und Bodenwanne. Als Resultat ergibt sich eine vergleichsweise geringe Intrusion von 216 mm, bei einem Gewicht der Karosseriestruktur von 80 kg. Bei einem 4-sitzigen Referenzfahrzeug beträgt die Intrusion beim Pfahlcrash dagegen 380 mm, bei einem Strukturgewicht von rund 180 kg.

Funktionsintegrierter Extremleichtbau in Sandwichbauweise

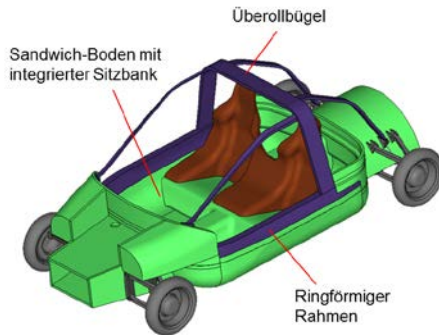


Abbildung 5: Fahrgastzelle in Sandwichbauweise mit ringförmigem Rahmen

Ein weiterer Vorteil der neuartigen Fahrgastzelle liegt in ihrer Unempfindlichkeit gegenüber Überlastung der Struktur. Aufgrund der Stützfunktion der Sandwichkerne kommt es auch bei einer Überlastung der Fahrgastzelle nicht zu einem katastrophalen Kollabieren, sondern lediglich zu einer geringen Deformation der Fahrgastzelle (Abbildung 7). Bei dieser frühen Variante der Karosseriestruktur, war der Vorderwagen im Verhältnis zur Fahrgastzelle noch zu steif ausgelegt. Dadurch wurde die Fahrgastzelle beim Frontalcrash überlastet, was zur dargestellten Deformation führte.

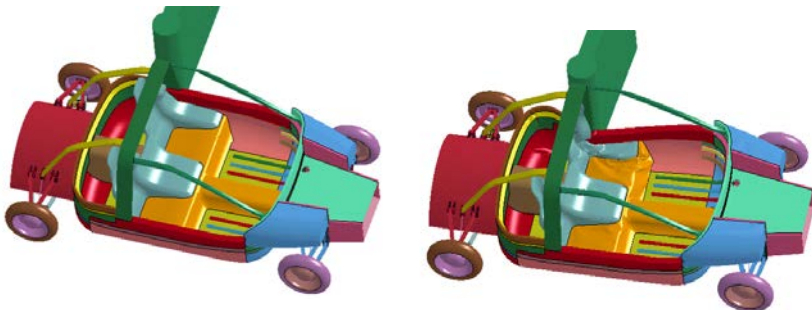


Abbildung 6: Verhalten der Fahrgastzelle beim Euro-NCAP Pfahlaufprall mit 29 km/h (LS-Dyna Rechnung)

Funktionsintegrierter Extremlleichtbau in Sandwichbauweise

Eine ähnliche Unempfindlichkeit der Struktur ist bei Änderungen von Ort und Richtung der Lasteinleitung zu erwarten. Insgesamt ergibt sich ein gutmütiges Versagensverhalten, das es ermöglicht, Sicherheitsfaktoren gegen Kollabieren zu reduzieren, und somit Masseneinsparungen zu realisieren.

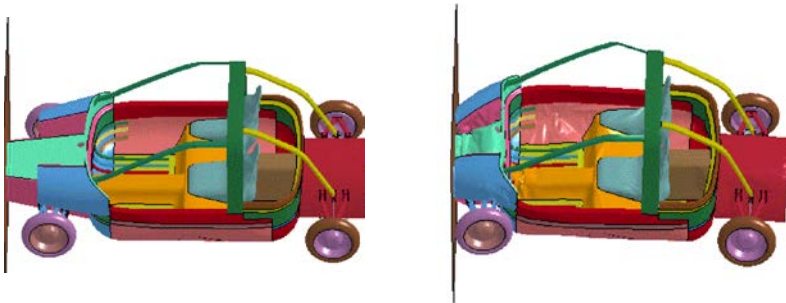


Abbildung 7: Verhalten der Fahrgastzelle im US-NCAP-Frontalaufprall mit 56 km/h

Vorderwagen

Der Vorderwagen und die Heckstruktur eines Fahrzeuges sind neben den Türbereichen die am Häufigsten von Unfallbeschädigungen betroffenen Strukturbauteile, bzw. Baugruppen. Vor allem der Vorderwagen muss ausgehend von unterschiedlichen Normcrashlastfällen an die daraus resultierenden Belastungen und Verformungen angepasst werden. Eine Hauptaufgabe der hier gezeigten Vorderwagenstruktur in Sandwichbauweise ist die Absorption von Deformationsenergie, um der dahinter liegenden Fahrgastzelle und den darin befindlichen Insassen möglichst hohen Schutz bieten zu können. Die Herausforderung dieses Konzeptes liegt, wie auch bei der Fahrgastzelle, in der Realisierung einer gutmütig versagenden Struktur. Die Konzeption eines Vorderwagens in einer neuartigen Bauweise erfordert damit grundsätzliche werkstoff- und gestaltbezogene Untersuchungen.

Weiteres Ziel ist es, das Verformungs- bzw. Versagensverhalten dieser Gesamtstrukturen dahingehend effizient zu gestalten, dass ein möglichst hohes massespezifisches Energieabsorptionsvermögen realisiert werden kann. Die numerische Betrachtung eines mittleren Bereichs der Vorderwagenstruktur lieferte hierfür erste Erkenntnisse. Abbildung 8 stellt das Verformungsverhalten dieses konischen Abschnittes mit einem rechteckigen Querschnitt bei einem möglichen Frontalaufprall dar. Die Steifigkeit dieses Bauteils nimmt ausgehend von der Kollisionsfront zu. Die Faltenbildung erfolgt ungleichmäßig, was unter anderem auf die Unstetigkeit in den Eckbereichen

Funktionsintegrierter Extremleichtbau in Sandwichbauweise

und das hohe Losbrechkraftniveau zurückzuführen ist. Die Faltenbildung findet weitestgehend von vorne nach hinten statt. Durch parametrische Anpassungen kann das Potential weiter optimiert werden.



Abbildung 8: Sandwichkasten als Vorderwagenmittelbauteil in Einzelbetrachtung

Das Versagensverhalten wurde durch die Kombination dieses Mittelbereichs mit außen liegenden Seitenkästen verbessert. Abbildung 9 zeigt den numerisch berechneten Vorderwagen des vorgestellten Karosseriekonzeptes vor (links) und nach (rechts) einer frontalen Kollision. Ergänzt sind die unterhalb der Seitenkästen angeordneten Fahrwerkelemente dargestellt. Sowohl der Mittelbereich des Vorderwagens, als auch die Seitenkästen nehmen Deformationsenergie auf und bilden Falten in den Sandwichdecklagen aus. Die Steifigkeit und Festigkeit des Vorderwagens wird durch die in Fahrzeuglängsrichtung versetzt angeordneten Seitenkästen ab einem definierten Deformationsfortschritts gesteigert.

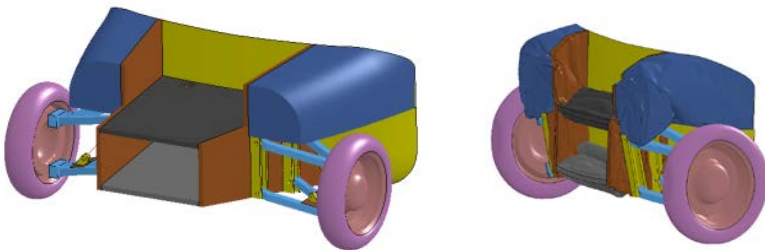


Abbildung 9: Sandwichvorderwagenstruktur vor und nach einem Frontalcrash

Die Vorderwagen- und die Heckstrukturen von Fahrzeugen müssen zu den dynamischen Crashlasten statische Betriebslasten aufnehmen können. Fahrzeugrohbaustrukturen werden nach den Kriterien der Torsions- und der Biegesteifigkeit bewertet. Geschlossene Bauteile (vgl. Mittelkasten und Seitenkästen) besitzen ein hohes Trägheitsmoment und eignen sich gut zur Aufnahme von Torsions- und Biegebelastungen. Die Kombination dieser innovativen Vorderwagenstruktur mit einer angepassten Fahrgastzellenstruktur unterstützt dieses Verhalten. Auf Grund dieser Vielzahl an Belastungsfällen ist eine wie in Abbildung 9 dargestellte Plattenbauweise aus numerischer Sicht sinnvoll, muss allerdings durch Realversuche validiert werden.

Funktionsintegrierter Extremleichtbau in Sandwichbauweise

In Unfallszenarien, welche mit wenig gegenseitiger Überdeckung der kollidierenden Fahrzeuge stattfinden wird die Vorderwagenstruktur sehr asymmetrisch belastet. Die Segmentierung des Vorderwagens in einen Mittelbereich und die beiden Seitenkästen ermöglicht eine auf diese Crashlastfälle gut adaptierbare Struktur. Schräg auftreffende Belastungen, die durch nicht exakt frontal miteinander kollidierenden Fahrzeugen entstehen können, werden durch das Sandwich-Bauweisen-Konzept, welches sich durch die Aufteilung in mehrere kastenförmige Absorptionsstrukturen auszeichnet, von der Struktur ebenso aufgenommen.

Diese tragenden Strukturen können je nach Fahrzeugausstattung mit unterschiedlichen Komponenten des Antriebsstrangs oder zur Steuerung des Fahrzeugs bestückt werden. Sandwichstrukturen bieten in Form von Inserts einige Möglichkeiten bei der Herstellung Anbindungspunkte direkt in die Struktur zu integrieren. Separat angebrachte Flansche und Haltevorrichtungen können hierdurch entfallen, was der Massebilanz zu Gute kommt.

Letztendlich kann mit diesem Sandwich-Bauweisen-Konzept eine kostengünstige, massereduzierte und sichere Vorderwagenstruktur geschaffen werden. Die geringe geometrische Komplexität und der hohe Funktionsintegrationsgrad stellen weitere fertigungs- und montagebedingte Vorteile dar.

Fazit und Ausblick

Es wurde ein Karosseriekonzept mit einer Strukturmasse von nur 80 kg vorgestellt und dessen Verhalten in verschiedenen Crashlastfällen untersucht. Durch seinen Sandwichaufbau sowie die beschriebenen Gestaltungsmerkmale zeigt das Konzept in der Simulation, trotz der geringen Strukturmasse durchweg ein gutes Crashverhalten, ohne lokales Kollabieren und mit geringen Intrusionen.

Die nächsten Schritte im Projekt bestehen, neben der Weiterentwicklung einiger Komponenten, wie z.B. Sitzschalen, Sitzbank oder Heckstruktur, in der Erstellung eines Herstellungskonzeptes. Ziel ist die Fertigung eines Karosseriedemonstrators, dessen Eigenschaften durch Versuche auf der Craschanlage des DLR-FK verifiziert werden sollen. Aus diesem Karosseriedemonstrator wird im weiteren Projektverlauf ein fahrfähiger Gesamt-Fahrzeug-Demonstrator aufgebaut. Dadurch können Erfahrungen mit der Integration von Antriebs- und Fahrwerkskomponenten in die Karosseriestruktur, sowie mit dem Verhalten von Struktur und Komponenten im Fahrbetrieb gewonnen werden. Im Anschluss an die Versuchsphase wird die Überführung in eine Serienproduktion, in Zusammenarbeit mit Industriepartnern, angestrebt. Die geringe Anzahl an Bauteilen und die wenig komplexe Formgebung dieser Teile reduzieren dabei das Investitionsrisiko und erleichtern so den Einstieg in eine Produktion. Dies ist insbesondere bei Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten, die zunächst eher in geringen Stückzahlen abgesetzt werden können, ein wesentlicher Faktor.

Bei der Berechnung und Auslegung von Sandwichstrukturen ist zur Zeit noch die Darstellung des Verhaltens der Sandwichkerne problematisch, da beispielsweise ein Schaumkern fein verzweigte Risse ausbilden oder in kleine Stücke zerbrechen kann. Diese lassen sich in der FE-Rechnung so nicht abbilden. Um die in der Simulation gezeigten, guten Crascheigenschaften zu bestätigen, ist daher der Aufbau und Test der realen Struktur notwendig.

Die Verfeinerung von Materialmodellen und Berechnungsmethoden ist darüber hinaus ein wichtiges Forschungsthema, um die Potenziale der Sandwichbauweise im Automobilbau besser nutzbar zu machen.

Literaturverzeichnis

- [1] WIEDEMANN, JOCHEN Vorlesungsskript: Kraftfahrzeuge I, Wintersemester 2006/2007, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
- [2] Eckstein, Lutz et al.: Analyse sekundärer Gewichtseinsparpotenziale in Kraftfahrzeugen, ATZ 01/2011
- [3] http://www.bmw-i.de/de_de/concept/
- [4] H C Davies; M Bryant; M Hope; C Meiller: Design, development, and manufacture of an aluminium honeycomb sandwich panel monocoque chassis for Formula Student competition; Journal of Automobile Engineering 2011
- [5] Prof. Horst E. Friedrich, Alternative Antriebssysteme und Fahrzeugkonzepte Teil I, Werkstoffe und Bauweisen, Vorlesungsskript
- [6] Innovative Vehicle Concept for the Integration of Alternative Power Trains, Philipp Steinle, Michael Kriescher, Horst E. Friedrich, Prof. Dr., German Aerospace Center / Institute of Vehicle Concepts, Stuttgarter Symposium 2010
- [7] Metal-hybrid structures for an improved crash behaviour of car body structures, Michael Kriescher, Walid Salameh, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), DEDr. Alexander Droste, Jan Röttger, DOW Automotive Systems, Materialien im Karosseriebau 2010
- [8] Entwicklung einer Karosseriestruktur für ein Fahrzeug mit Brennstoffzellen-Elektroantrieb Marie-Louise Hertfelder 21. Oktober 2011, Master Thesis