



Schlussbericht/Jahresbericht 25. Januar 2010

Entwicklung einer Karosserie in Sandwich-Plattenbauweise für ein Elektrofahrzeug

Bewertung der passiven Sicherheit anhand eines Crashversuchs und numerischer Optimierungen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Mobilität
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Alcan Technology & Management, Badische Bahnhofstrasse 16, 8212 Neuhausen
Alcan Airex AG, Industrie Nord, 5643 Sins
AXA Winterthur Versicherungen, General Guisan-Str. 40, 8400 Winterthur

Auftragnehmer:

Alcan Technology & Management
Badische Bahnhofstrasse 16
8212 Neuhausen
www.alcan.com

AXA Winterthur Versicherungen
General Guisan-Str. 40
8400 Winterthur
www.axa-winterthur.com

Autoren:

Prof. Dr. Markus Henne, Hochschule für Technik Rapperswil, mhenne@hsr.ch
Dipl.-Ing. Jörg Dold, Alcan Technology & Management AG, joerg.dold@alcan.com
Dr.-Ing. Jan Rothe, Alcan Technology & Management AG, jan.rothe@alcan.com

BFE-Bereichsleiter: Rolf Schmitz

BFE-Programmleiter: Martin Pulfer

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154242 / 103217

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Abstract

An der Hochschule für Technik Rapperswil HSR wurde ein Elektroleichtfahrzeug in Plattenbauweise entwickelt. Die Karosserie des Fahrzeuges ist aus ebenen Sandwichplatten aus Aluminiumdeckschichten mit PVC-Schaumkern aufgebaut, welche durch Steck- und Klebeverbindungen zueinander positioniert und verklebt werden. Dieses Verfahren ist geeignet, um Fahrzeuge in kleinen Stückzahlen kosteneffizient zu fertigen. An einem vereinfacht aufgebauten Kleinfahrzeug wurden Crashversuche durchgeführt, um das Potential der passiven Sicherheit zu überprüfen. Dabei wurde das Fahrzeug in einem ersten Versuch mit 75% Überlappung gegen eine starre Barriere gefahren und in einem zweiten Versuch seitlich von einem konventionellen Fahrzeug angefahren. In beiden Fällen betrug die Kollisionsgeschwindigkeit 40km/h. Das Resultat zeigt, dass mit dieser einfachen Bauweise und den kosteneffizienten Materialien Sicherheitszellen mit extrem hoher Steifigkeit gebaut werden können, welche den Überlebensraum der Passagiere garantieren. Für eine virtuelle Optimierung der Fahrzeugstruktur wurde der Crash numerisch modelliert. Schwierigkeiten bereiteten die Abbildung des Deformations- und Versagensverhaltens des Schaumkerns, sowie die Modellierung der Verbindungsstellen. Trotzdem konnte partiell eine Übereinstimmung mit den experimentellen Resultaten gefunden werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen flossen direkt in die Entwicklung des Prototypenfahrzeuges e'mo ein, welches am Automobilsalon in Genf 2009 erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt wurde (www.e-mo-car.ch).



1. Ausgangslage

An der Hochschule für Technik Rapperswil wurde ein neuartiges Elektroleichtfahrzeug entwickelt. Es handelt sich um ein Kleinfahrzeug mit der Transportkapazität für drei Erwachsene Personen. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt 80km/h, die Reichweite ist abhängig von der Batteriekapazität, aktuell 50km. Durch konsequenten Leichtbau konnte das Gewicht dieses Leichtfahrzeuges auf einen Bruchteil von konventionellen Fahrzeugen reduziert werden. Das letzte und am weitesten ausgereifte Prototypenfahrzeug e'mo wurde im März 2009 am Automobilsalon der Öffentlichkeit vorgestellt. Informationen zum Fahrzeug finden sich unter www.e-mo-car.ch.



Abbildung 1: Elektrofahrzeug e'mo

Bei der Entwicklung wurde gezielt darauf geachtet, dass das Fahrzeug in einer Kleinserie (einige hundert bis wenige tausend Fahrzeuge) kosteneffizient gefertigt werden kann. Das Ziel soll unter anderem durch die eigens dafür entwickelte Sandwich-Plattenbauweise erreicht werden. Die Plattenbauweise erlaubt eine kosteneffiziente Fertigung der Karosserie mit günstigen und verfügbaren Materialien, ohne die sonst in der Automobilindustrie üblichen, hohen Werkzeugkosten.

Die Entwicklung der Fahrzeuge wurde durch Industriesponsoring, das Bundesamt für Energie BfE und die Hochschule Rapperswil HSR finanziert.

2. Zielsetzungen

Moderne Personenfahrzeuge weisen ein hohes Mass an passiver Sicherheit auf. Auch Klein- und Leichtfahrzeuge müssen für einen erfolgreichen Markteintritt ein hohes Mass an passiver Sicherheit garantieren. Aus diesem Grunde soll eine Crashstruktur in Sandwichbauweise entwickelt werden. Basierend auf diesem Hintergrund werden folgende Ziele abgeleitet:

- Ziel 1: Charakterisierung des Crashverhaltens der Strukturschäume von Alcan Airex AG. Modellbildung des Crashverhaltens mit Hilfe der Finite Element Simulation. Verifizierung der Ergebnisse anhand eines Crashversuches an einem Leichtfahrzeug.
- Ziel 2: Nachweis der Crashtauglichkeit des Elektroleichtfahrzeuges am Beispiel eines Crashszenarios im inner- und ausserstädtischen Verkehr.

Alcan hat die Zielsetzung wie folgt formuliert:

Durch die Zusammenarbeit in diesem Projekt sollen mehr Kenntnisse im Bereich der Kernwerkstoffe für Leichtbauweisen im Fahrzeugbau erlangt werden. Es ist das Ziel, mit den erlangten Erkenntnissen neue innovative Produkte anzubieten, die zur Einsparung von Energie und CO₂ beitragen. Dazu sollen die Kompetenzen am zentralen Forschungsstandort in Neuhausen im Bereich der Crash-Simulation für Anwendungen der Alcan Strukturschaumstoffe und Sandwichprodukte ausgebaut werden (Erarbeitung von Know-How zur Materialcharakterisierung und ermitteln der Kenndaten der Materialien für die Crash-Simulation). Die Crash Simulation soll relevante Aussagen über die Eignung der Alcan Materialien für das Crash Verhalten von Leichtfahrzeugen der neuen Generation liefern.

3. Fahrzeugstruktur

3.1. Einleitung

Ein passives Frontalaufprallschutzsystem soll bei einem Crash die Kollisionsenergie absorbieren und so die Insassen des Fahrzeuges vor Verletzungen schützen. Die Energie muss so abgebaut werden, dass die Insassen die Beschleunigungen im Crash ertragen können und die Fahrgastzelle soweit unbeschädigt bleibt, dass die Insassen bei der Deformation der Fahrzeugstruktur nicht verletzt werden [1-5]. Zusätzlich ist die Frontpartie so zu gestalten, dass sie im Falle einer Kollision mit Fussgängern minimales Verletzungsrisiko mit sich bringt. Der Fokus dieser Arbeit liegt bei der Überprüfung der Crashtauglichkeit des neu entwickelten Karosseriekonzeptes in Plattenbauweise. Insbesondere der Vorderwagen soll auf seine Crashtauglichkeit optimiert und getestet werden.

3.2. Stand der Technik

Bei konventionell hergestellten Personenkraftwagen, welche in hohen Stückzahlen produziert werden, sind üblicherweise drei Zonen vorgesehen, welche je nach Intensität des Crashes stufenweise deformiert werden (Abbildung 2). Bei einem leichten Auffahrunfall bzw. bei der Kollision mit einem Fussgänger wird die erste Zone des Frontends deformiert. Dort wird die Energie durch Deformation der Schäume unter der Frontabdeckung aus Kunststoff aufgenommen (1).

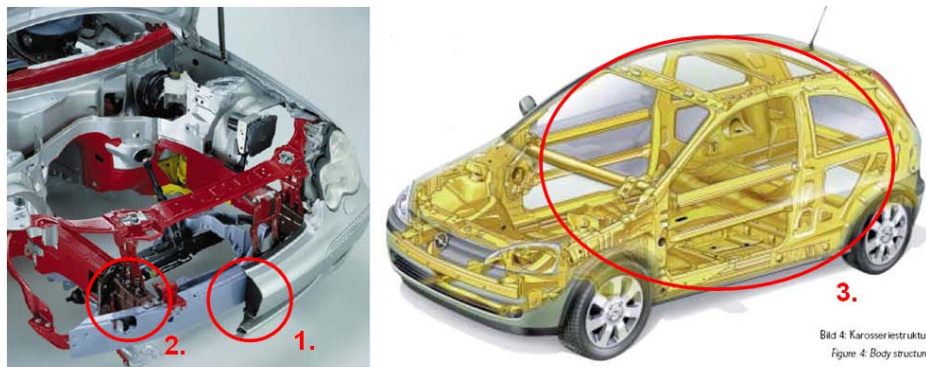


Abbildung 2: Energieabsorptionselemente am Frontend bei einem konventionellen Fahrzeug

Muss mehr Energie abgebaut werden, wird der Stossfänger deformiert (2). Der Querträger mit den beiden Crashboxen baut die Kollisionsenergie durch plastische Verformung ab. Vom Stossfängersystem können so Kollisionen, wie zum Beispiel der im AZT-Test definierte Auffahrunfall von 16km/h aufgefangen werden, ohne dass grössere Beschädigungen an der Primärstruktur des Fahrzeuges auftreten. Für die Stossfängersysteme werden üblicherweise duktile Stahl- oder Aluminiumlegierungen eingesetzt.

Im Falle von Hochgeschwindigkeitstests wird die gesamte Fahrzeugstruktur deformiert, dabei wird der Längsträger im Vorderwagen verformt und der Motorblock und weitere Aggregate verschoben. Die Fahrgastzelle soll dabei weitgehend bestehen bleiben, um den Überlebensraum der Passagiere zu garantieren.

Die einzelnen Crashzonen sind von einander mechanisch getrennt. Dadurch wird gewährleistet, dass einzelne Baugruppen bei der Reparatur einfach ersetzt werden können (Abbildung 3).



Abbildung 3: Modularer Aufbau einer Vorderwagenstruktur.

Die Vorderwagenstruktur darf während des Crashes nicht auseinander brechen, da ansonsten nichtvorhersehbare Versagensbedingungen auftreten. Deshalb ist bei der Konstruktion darauf zu achten, dass die Crashstruktur so ausgelegt ist, dass diese auch bei grossen Deformationen in einem Verbund bleibt.

3.3. Neues Konzept

Der Vorderwagen wird aus ebenen Sandwichplatten (Aluminium-Polymerschaum-Aluminium) aufgebaut (Abbildung 4). Der Vorderwagen besteht aus einer zentralen Crashbox in der die Batterie untergebracht ist und direkt an die Spritzwand angebunden wird.

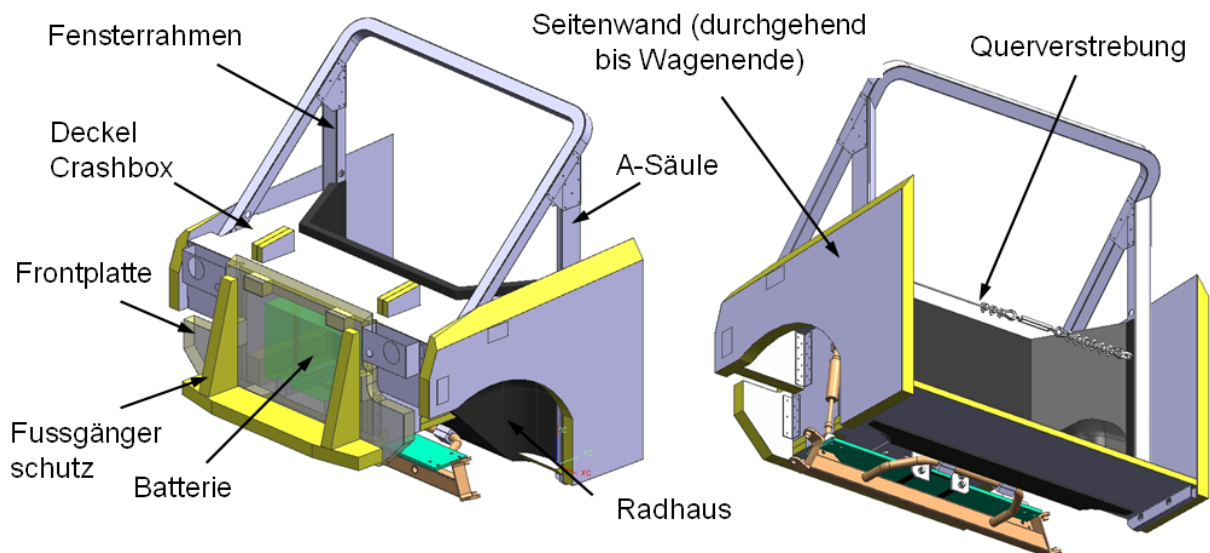


Abbildung 4: Vorderwagen in Sandwich-Plattenbauweise.

Um eine einfache Ausrichtung bei der Montage zu gewährleisten, sind alle Elemente mit Zapfenverbindungen versehen, welche eine einfache Positionierung der Elemente zueinander und eine feste Verbindung zwischen den Plattenelementen garantieren (Abbildung 5). Die Einzelteile werden mit einer zähelastischen Polyurethan-Dickschichtverklebung gefügt.

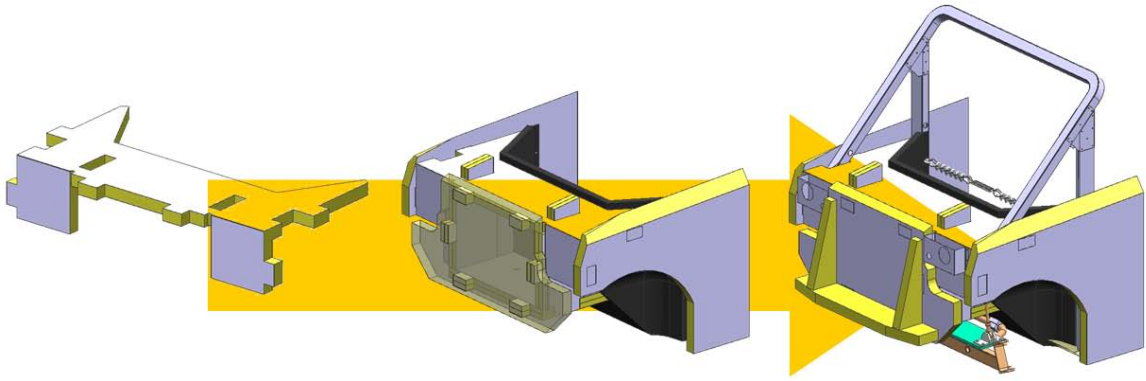


Abbildung 5: Aufbau des Vorderwagens aus gesteckten Plattenelementen.

Im Falle einer Frontalkollision wird die Energie durch Zerstörung der Crashbox abgebaut. Die Kräfte werden dabei über die Spritzwand und die A-Säulen auf die Sicherheitszelle eingeleitet. Die Crashbox übernimmt in diesem Falle zusätzlich die Funktion des Vorderwagens. Deshalb werden auch die Anbindungspunkte von Fahrwerk, Batterie, Verschalung usw. an die Crashbox montiert. Der Schaum unter der Schürze fängt leichte Kollisionen ab und soll Fussgänger vor Verletzungen schützen, ohne dass die tragende Fahrzeugstruktur beschädigt wird.

4. Materialien

4.1. Materialauswahl

Die Materialien für die Sandwichplatten sollen folgenden Anforderungen genügen:

- hohes Energieaufnahmevermögen, duktil
- leicht, korrosionsbeständig
- verfügbar, kostengünstig

Für die Deckschichten der Sandwichplatten werden Aluminiumbleche mit der Legierung EN AW-AMg1 (Peraluman 100, 1.5mm) und EN AW AIMg3 (Peraluman 300, 1.5mm) ausgewählt. Beide Legierungen sind halbhart und weisen gute Umformeigenschaften bei gleichzeitig hoher Korrosionsbeständigkeit auf.

Für den Schaumkern kommen PVC Schäume Airex C70 mit den Raumgewichten RG 40/55/75 kg/m³ und Airex R63 zur Anwendung. Airex C70 ist ein geschlossenzelliger, vernetzter Hartschaumstoff mit guter Steifigkeit sowie einem sehr guten Gewicht-Festigkeit Verhältnis. Er eignet sich sehr gut als Kernmaterial für leichte, dynamisch oder statisch belastete Sandwichstrukturen. Der Airex R63 ist ein geschlossenzelliger Hartschaumstoff mit einer extrem hohen Schadenstoleranz. Dieser Schaum ist ein ausgezeichnetes Kernmaterial für dynamisch beanspruchte und für Schlagenergie absorbierende Sandwichstrukturen. Die Materialien werden quasistatisch und dynamisch geprüft.

4.2. Materialprüfungen

Um das Versagensverhalten zu erforschen werden statische und dynamische Versuche an einfachen Sandwich-Prüfkörpern durchgeführt. Folgende Prüfsysteme kommen dabei zur Anwendung:

A. Statische Prüfungen: Zug- Druckprüfmaschine Zwick-Roell der HSR

- Kraftmessdose mit einem Bereich von 250 N - 250 kN
- Wegaufnehmer in einem Bereich von 0 – 2000 mm, Auflösung 0.01 mm
- Möglichkeit mit Feindehnaufnehmer zu messen
- Einspannlänge 100 – 1800 mm, Breite 400 mm
- Zusatzmodule Klimakammer, Videoextensiometrie

Versuch	Ziel des Versuchs
Zugversuche mit Schaum- und Aluminiumproben nach ISO 1926 und DIN 50125	σ - ϵ -Diagramm, E- Modul
Druckversuche mit Schaumproben nach ISO/FDIS 844	Energieaufnahmevermögen bei statischer Druckbelastung
Druckversuche mit Sandwichproben	
3Pkt.-Biegeversuch liegend mit Sandwichproben angelehnt an den Vierpunktbiegeversuch nach DIN 53293	
3Pkt.-Biegeversuch stehend mit Sandwichproben	

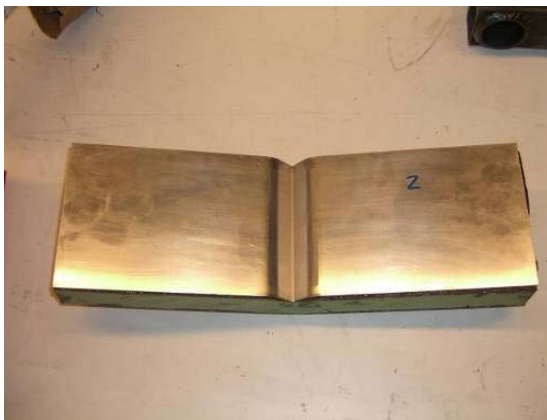


Abbildung 6: Statisch geprüfte Sandwichelemente.

B. Dynamische Prüfungen: Fallturm bei TyssenKrupp Presta in Eschen FL

Der Fallturm der Firma TyssenKrupp Presta ist eine Eigenkonstruktion und wird hauptsächlich zur Prüfung von Fahrzeug- Lenksäulen verwendet. Zur Messung der Kraft wird ein piezoelektrischer Beschleunigungssensor eingesetzt, welcher Kräfte bis 200 kN erfassen kann. Die Messgenauigkeit liegt bei 1%. Für die Wegmessung stehen ein Faden- und ein Linearpotentiometer zur Verfügung.

- Messbereich max. bis 200 kN, Abtastrate bis 20kHz
- Fallhöhe 0 - 1.8 m, Fallgewicht 44.5 kg
- Messbare Größen F [N] / Zeit [s] / Weg [mm]
- Film max. Speed 1000 b/s, Format der Messrohdaten txt, Filmformat avi

Versuch	Ziel des Versuchs
Druckversuche mit Schaumproben mit und flachem Druckkörper	Energieaufnahmevermögen der Schäume
Druckversuche mit Sandwichproben und zylindrischem Eindruckkörper	Energieaufnahmevermögen in Plattenebene ermitteln Verformungsverhalten der Sandwichplatte analysieren
3Pkt.-Biegeversuch liegend mit Sandwichproben	Energieaufnahmevermögen bei zylindrischem Eindruckkörper
3Pkt.-Biegeversuch stehend	

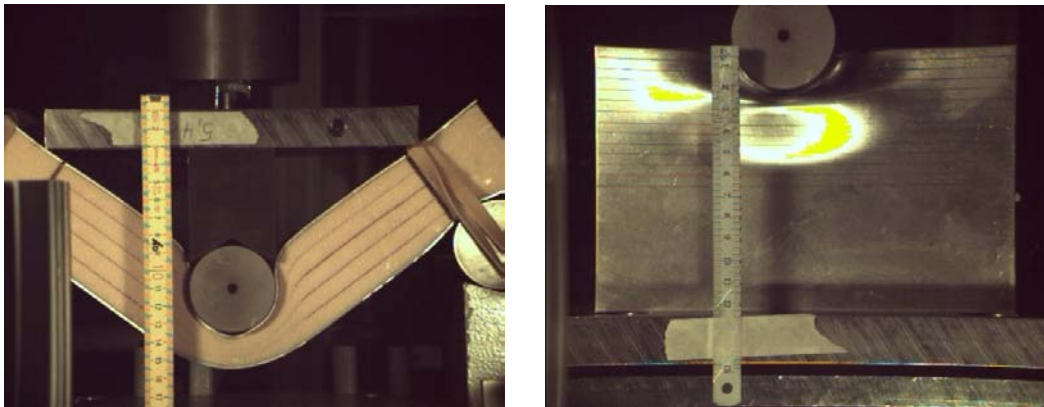


Abbildung 7: Dynamisch geprüfte Sandwichelemente.

Die Resultate werden hier nicht detailliert dargestellt (Abbildung 6 und 7), stattdessen wird auf das Dokument [6] verwiesen.

4.3. Materialwahl aufgrund der Materialuntersuchungen

Aufgrund der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen an Aluminiumblech-, Schaum- und Sandwichproben wurden die Materialien ausgewählt. Für die Vorderwagenstruktur wird ein Sandwich aus C70.75 Schaum und EN AW-ALMg1 Deckschichten gewählt. Der Schaum C70.75 wies die höchste Energieaufnahme aller getesteten Schäume auf. Die Klebeverbindung war deutlich widerstandsfähiger als jene beim C70.55 oder C70.40. Die schlechte Temperaturbeständigkeit von max. 60°C und die hohen Kosten sprechen gegen den Schaum R63.60, obwohl er hervorragendes Versagensverhalten aufweist.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die getesteten Sandwichbauteile mit 100mm Dicke zu steif für die vorgeschlagene Crashstruktur sind. Aus diesem Grunde wird die Dicke des Schaumkerns von 100 auf 50mm reduziert. Zudem werden die Aluminiumdeckschichten von 1.5 auf max. 1mm reduziert. Deshalb fiel die Wahl auf ein Blech der Legierung EN AW-ALMg1, welches in 1mm Dicke verfügbar ist.

5. Testfahrzeug & Test

5.1. Testfahrzeug

Mit dem im Kapitel 3 beschriebenen Vorderwagen wurde ein vereinfachtes Crashfahrzeug aufgebaut (Abbildung 8).

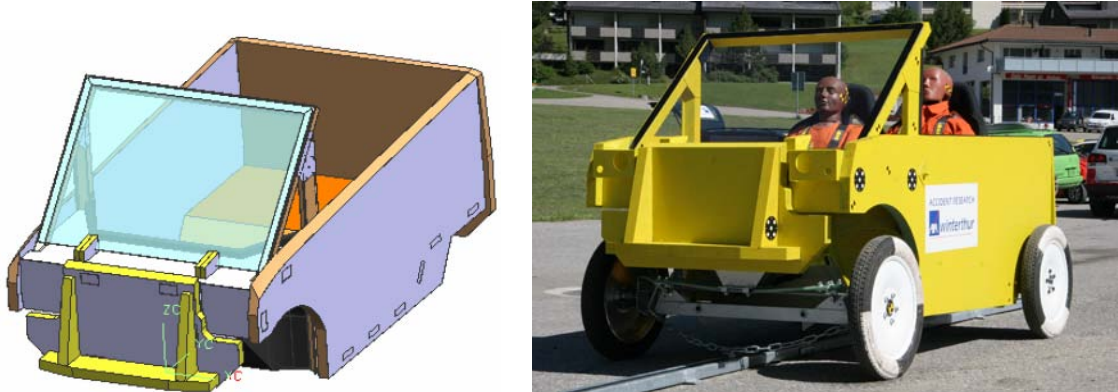


Abbildung 8: CAD-Modell der Sandwichstruktur (links) und reales Fahrzeug (rechts).

Technische Spezifikation des Fahrzeuges:

- Dimensionen der Karosserie (l x b x h)	2405 x 1300 x 1514 mm
- Gewicht des Testfahrzeuges	400 kg
- Radstand	1818 mm
- Spur vorne / hinten	1414 / 1560 mm

Aus Zeitgründen konnte im Vorfeld keine detaillierte numerische Crashsimulation durchgeführt werden. Stattdessen wird das Versuchsfahrzeug in einem Crashversuch dynamisch geprüft.

Beim Crashversuch, welcher von der Firma AXA Winterthur durchgeführt wurde, wird das Fahrzeug über einen Seilzug von einem leistungsstarken Fahrzeug gegen die Barriere beschleunigt. Das Crashfahrzeug wird dabei bis auf einige Meter vor der Barriere mit Hilfe einer Metallschiene geführt.

5.2. Messtechnik

Das Crashfahrzeug wurde mit verschiedenen Mess-Sensoren ausgestattet. Die Primäreinheit bildete ein DSD Pocket QAQ (Abbildung 9). Diese von DSD (Dr. Steffan Datentechnik, A-Linz) entwickelte Einheit umfasst einen dreiaxialen 50g Sensor, einen dreiaxialen 5g Sensor und zur Erfassung der Winkelgeschwindigkeit einen Gyrosensor. Die freiwählbare Abtastrate wurde auf den Standardwert von 10kHz eingestellt. Die Rohdaten werden mittels Tiefpassfilter gefiltert. Hierzu wird der in der Crashtechnik standardisierte CFC (Channel Filter Class) verwendet. Für Fahrzeugbeschleunigungen wird CFC60 angewandt. Leider zeichnete diese Einheit aufgrund eines technischen Fehlers keine Daten auf.

Im weiteren wurden diverse redundante Systeme im Fahrzeug verbaut. Das erste System ist eine Unfalldatenspeicher (UDS 1.3) von Kienzle Argo bzw. Siemens. Dieses Gerät wurde für den Einbau in strassenzugelassene Fahrzeuge entwickelt. Es zeichnet 29 Sekunden vor und 15 Sekunden nach einem Unfall Daten (Längs- und Querbewegungsbeschleunigung, Fahrzeuggeschwindigkeit und weitere Statussignale wie Bremslicht, Blinker usw.) mit 25Hz auf. Die Zeitspanne während der Kollision wird mit 500Hz aufgezeichnet. Die beiden Beschleunigungssensoren haben ebenfalls einen Messbereich von 50g.

Als zweites redundantes System wurde ein weiterer Unfalldatenspeicher (UDS 2.0) der zweiten Generation eingesetzt. Dieser unterscheidet sich vom UDS 1.3 wie nachfolgend be-

schrieben. Der UDS 2.0 hat mehr Speicherplätze für einzelne Ereignisse zur Verfügung und zeichnet im Normalbetrieb auch Fahrdynamikdaten auf. Im Falle eines Unfalles werden die Beschleunigungsdaten mit 250Hz abgespeichert.

Die eigentliche Messfrequenz der beiden Unfalldatenspeicher liegt um einiges höher. Die abgespeicherten Daten sind bereits gefiltert und benötigen keine weitere Nachbehandlung mehr.

Weitere Messeinheiten wie der in enger Zusammenarbeit mit AXA Winterthur entwickelte Crash Recorder als auch ein Prototyp einer Messeinheit von schwedischen Versicherer Folksam wurden ins Fahrzeug eingebaut. Alle vier Einheiten zeichneten Daten auf.

UDS: <http://www.mobatime.ch/de/unfalldatenspeicher-uds/>

Crash Recorder: <http://www.crash-recorder.ch/>

DSD: www.dsd.at

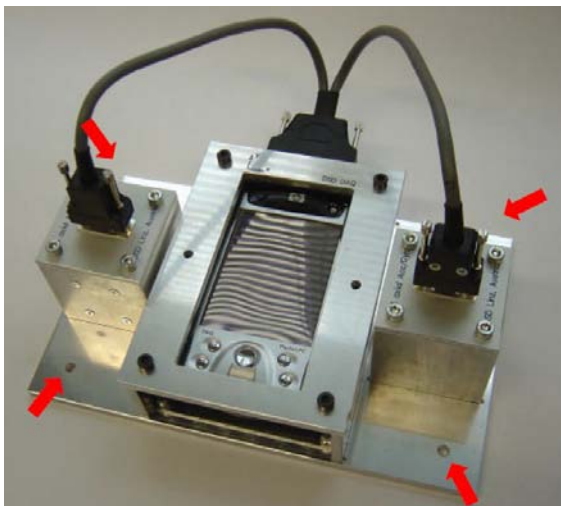


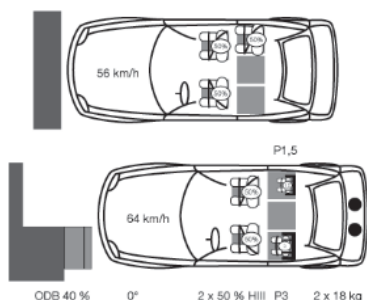
Abbildung 9: DSD Pocket QAQ zur Messdatenerfassung.

5.3. Testanordnung

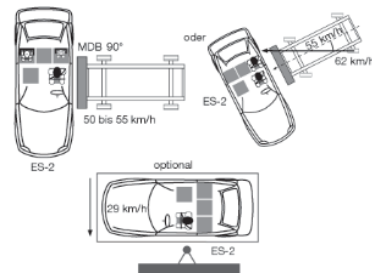
Weltweit existiert eine Vielzahl nationaler und internationaler Crashnormen. Aktuell sind Bemühungen im Gange eine weltweit gültige Norm zu definieren. Dabei sollen die Vorteile der bestehenden Testnormen vereint werden im sogenannten World NCAP (New Car Assessment Program). Darin enthalten sind mehrere Teiltests in welchen die Crashesicherheit eines Fahrzeuges bei verschiedenen Unfallszenarien geprüft wird.

Beim World NCAP sind Crashtest für Frontalkollisionen, Seitenaufprall und Fussgängerschutz geplant (Abbildung 10).

Frontalaufprall



Seitenaufprall



Fussgängerschutz

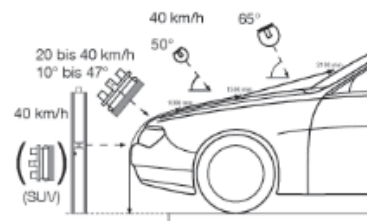


Abbildung 10: Kollisionen des World NCAP Tests.

Frontalaufprall:

1. Szenario: Frontalkollision auf ein starres Hindernis. Die Geschwindigkeit beträgt 56 km/h, die Barriere (stellvertretend für den Unfallgegner) ist starr (Betonwand). Das Fahrzeug trifft die Barriere mit einer Überdeckung von 100%.
2. Szenario: Frontalkollision mit entgegenkommendem Fahrzeug. Die Geschwindigkeit beträgt 64 km/h, die Barriere ist deformierbar um ein anderes Fahrzeug zu simulieren. Das Fahrzeug trifft die Barriere mit einer Teilüberlappung von 40%.

Seitenaufprall:

1. Szenario: Stehendes Fahrzeug wird von fahrendem Fahrzeug in die Seite gerammt. Beim Seitenaufprall mittels Rammwagen soll unter verschiedenen Winkeln die Crashsicherheit vom stehenden Fahrzeug getestet werden.
2. Szenario: Ein ins Schleudern gekommenes Fahrzeug trifft ein Baum. Beim Pfahltest soll die Crashsicherheit eines Fahrzeuges getestet werden, wenn dieses mit 29km/h seitlich auf einen Pfahl auftrifft.

Fussgängerschutz:

Bei diesem Versuch wird bewertet, welche Verletzungsgefahr die Frontpartie für Fussgänger darstellt.

Da der e'mo ein auf Leichtbau und für den Stadtverkehr ausgelegtes Fahrzeug ist, soll die Crashstruktur für dieses Umfeld ausgelegt werden. Dies soll in Anlehnung an die World NCAP-Norm geschehen. Als besonders kritisch wird eine Frontalkollision mit Teilüberlappung angesehen. Es wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit der Fahrzeuge unter 50 km/h liegt, da die Kollisionspartner vor dem Zusammenstoss meist stark abgebremst werden. Aus diesen Gründen wird folgendes Crashszenario vorgeschlagen (Abbildung 11):

- Frontalkollision gegen starre Barriere
- Kollisionsgeschwindigkeit: 40 km/h
- Teilüberlappung: 75%

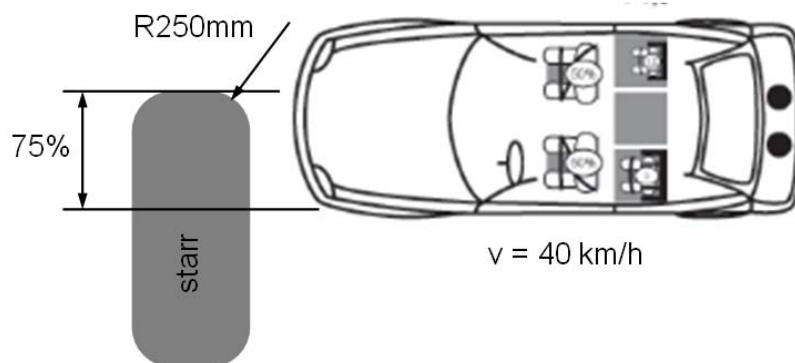


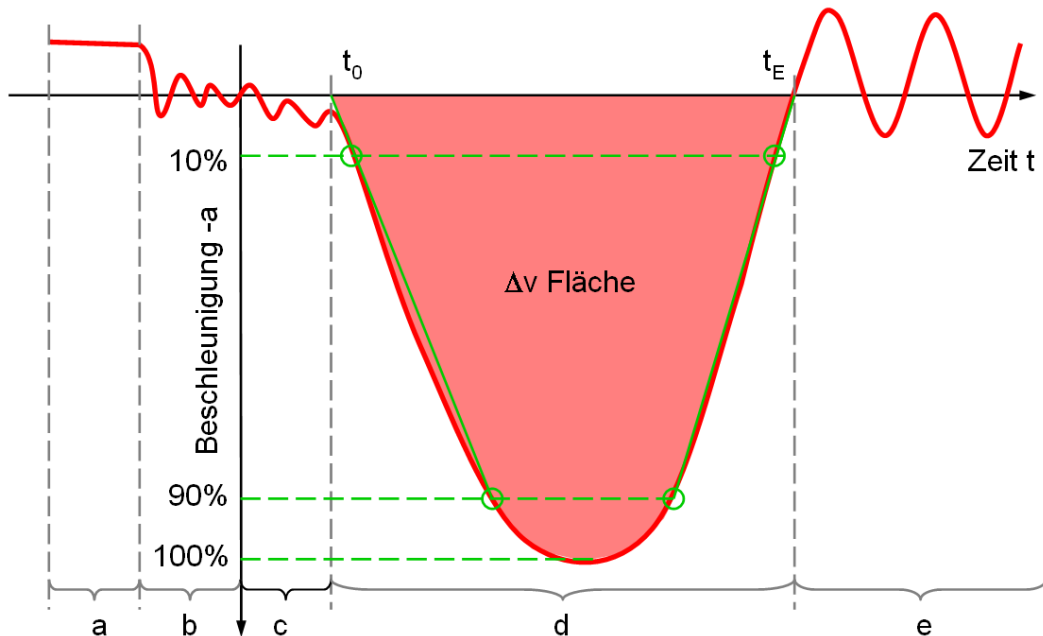
Abbildung 11: Testanordnung Frontalcrash.

Der Crashversuch WI 08.28 wurde am 10.07.2008 in Wildhaus durchgeführt.

6. Auswertung

6.1. Grundlagen

In Abbildung 12 wird qualitativ der zeitliche Verlauf der Beschleunigung im Falle einer Frontalkollision gezeigt. Aus dem Kurvenverlauf können Rückschlüsse auf die Belastung der Passagiere geschlossen werden. In der Legende der Abbildung 12 werden die charakteristischen Phasen a) bis e) einer Frontalkollision beschrieben.



Legende:

- a) Beschleunigung durch Zugfahrzeug
- b) Ende Schiene, Schwingungen im System
- c) Crash Facia / Schürze – Geringer Widerstand
- d) Crash Bumper und Längsträger. Die Fläche Δv entspricht der Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeuges
- e) Nachschwingen von Komponenten



Abbildung 12: Interpretation und Auswertung der Beschleunigungskurven

Entscheidend für die Belastung und das Verletzungsrisiko ist die Phase d), in welcher der grösste Teil der Kollisionsenergie abgebaut wird. Die maximale Beschleunigung sollte nicht zu hoch sein, was zur Folge hat, dass sich die Zeitdauer der Beschleunigungen verlängert um die Geschwindigkeit (Fläche unter der Kurve) abzubauen.

6.2. Resultate Frontaufprall

Die Abbildungen 13 zeigen einige Momentaufnahmen aus dem Frontalcrash des Fahrzeuges.



Abbildung 13: Frontalkollision mit 40km/h und 75% Überlappung gegen eine starre Barriere.

Es ist deutlich zu sehen, dass sich die Fahrzeugstruktur extrem steif verhält. Der Vorderwagen wird kaum deformiert. Untersuchungen am Fahrzeug haben gezeigt, dass die tragende Struktur durch den Crash kaum beschädigt wird. Obwohl extreme hohe Beschleunigungswerte (max. -75g) gemessen wurden, konnten keine Risse, geschweige denn eine Desintegration der Plattenbauweise festgestellt werden. Die Energie wurde grösstenteils durch die Verformung des Fahrwerkes und des Strukturschaums vor der Frontplatte abgebaut (Abbildung 14).



Abbildung 14: Schaumbruch im Strukturschaum vor der Frontplatte.

Die Analyse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen haben gezeigt, dass die Dummies noch aufrecht sitzen, wenn Fahrzeug bereits vollständig abgebremst ist. Ideal wäre, wenn die Passagiere möglichst früh an der Verzögerung teilnehmen. Aufgrund des kurzen Deformationsweges sind extrem hohe Beschleunigungswerte aufgetreten (Abbildung 15), welche ein hohes Verletzungsrisiko der Dummies mit sich bringen.

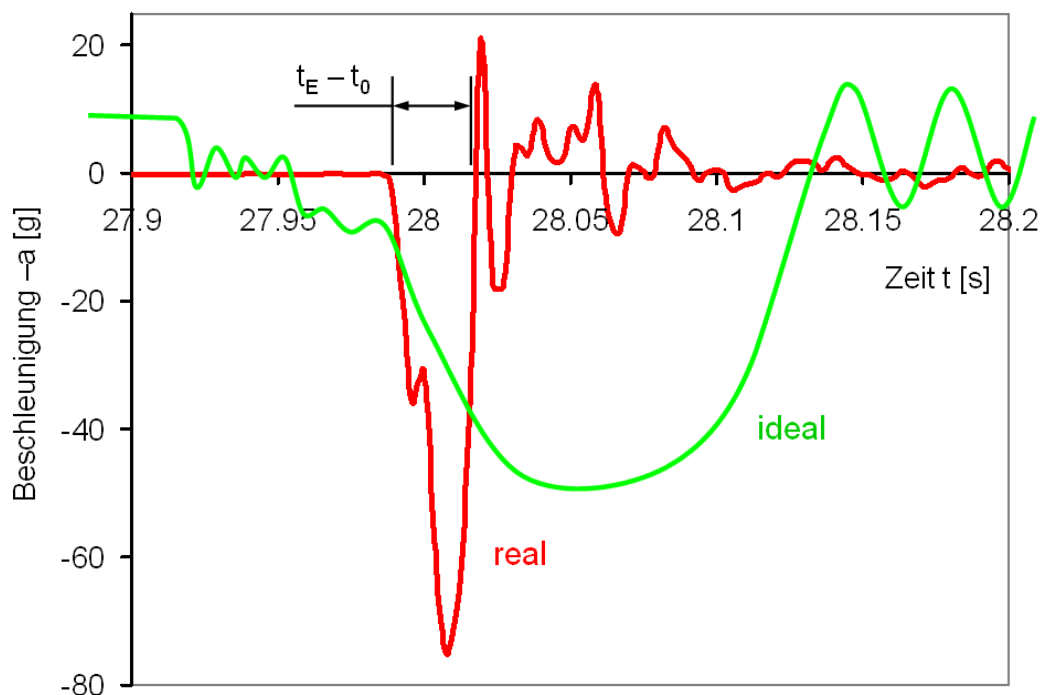


Abbildung 15: Reale (rot) und ideale (grün) Beschleunigungskurve beim Frontalcrash.

Eine Auswertung der Crashexperten der AXA- Winterthur ergab folgende Empfehlungen (Abbildung 15). Der Verlauf der Beschleunigung sollte sich wie folgt entwickeln:

- Stärkerer Beschleunigungsanstieg nach Kontakt der Facia mit Hindernis.
- Flacherer Verlauf der Δv Fläche, d.h. mehr Zeit um Crashenergie abzubauen. Die Zeitdifferenz $\Delta t = t_E - t_0$ sollte grösser sein, typisch 100-150ms.

6.3. Seitliche Kollision

Aufgrund der äusserst geringen Beschädigungen am Fahrzeug wurde entschieden, einen zweiten Crash mit einem konventionellen Personenwagen als Kollisionsgegner durchzuführen. Das Szenario sieht vor, dass der Personenwagen mit einer Gesamtmasse von ca. 1400kg das Testfahrzeug mittig und 90° mit einer Geschwindigkeit von knapp 40km/h trifft.

Auch in diesem Falle wird das Testfahrzeug vom Personenwagen weggeschoben (Abbildungen 17). Die Energie wird durch die Deformation der Seitenwände (Sandwichplatten), des Fahrwerks und der Felgen, sowie durch Reibung der Räder auf dem Untergrund abgebaut. Es werden maximale Beschleunigungswerte von 11g gemessen.

Die Beschädigungen am Fahrzeug sind wiederum äusserst gering. Das seitliche Sandwichpaneel ist partiell eingedrückt (Abbildung 16), der Überlebensraum der Passagiere wird nicht eingeschränkt.



Abbildung 16: Fahrzeugstruktur nach dem Seitencrash mit 40km/h.

6.4. Erkenntnisse

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Fahrzeugstruktur extrem steif verhält. Im Falle des Vorderwagens deutlich zu steif, was zu hohen Beschleunigungswerten führt und für die Passagiere lebensgefährlich ist. In der nachträglich durchgeführten Crashsimulation wird aufgrund dieser Erfahrungen ein neues Crashkonzept erarbeitet, bei welchem die Sandwich-Plattenbauweise ausschliesslich für die Sicherheitszelle, d.h. für die Sicherstellung des Überlebensraums angewendet wird.



Abbildung 17: Seitliche Kollision mit einem PKW (1'400 kg) mit 40km/h.

7. Crashsimulation

7.1. Einleitung

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Crashversuchen und einigen konzeptionellen Änderungen am Fahrzeugkonzept wurden folgende Änderungen an der tragenden Struktur vorgenommen (Abbildung 18):

- Die Traktionsbatterie ist neu unter den Sitzen in einer Box untergebracht, welche ebenfalls aus Sandwichplatten gefertigt ist.
- Die Sandwich-Plattenbauweise wird ausschliesslich für die Sicherheitszelle angewendet.
- Das Deformationselement im Vorderwagen wird als Schaumblock realisiert, welcher auf der Spritzwand abgestützt wird.
- Einbringung von seitlichen Türausschnitten. Die Position des Schwellers wird zur Verbesserung des Side-Impact-Verhaltens erhöht, um im Crashfall das Eindringen des Kollisionspartners zu verhindern.

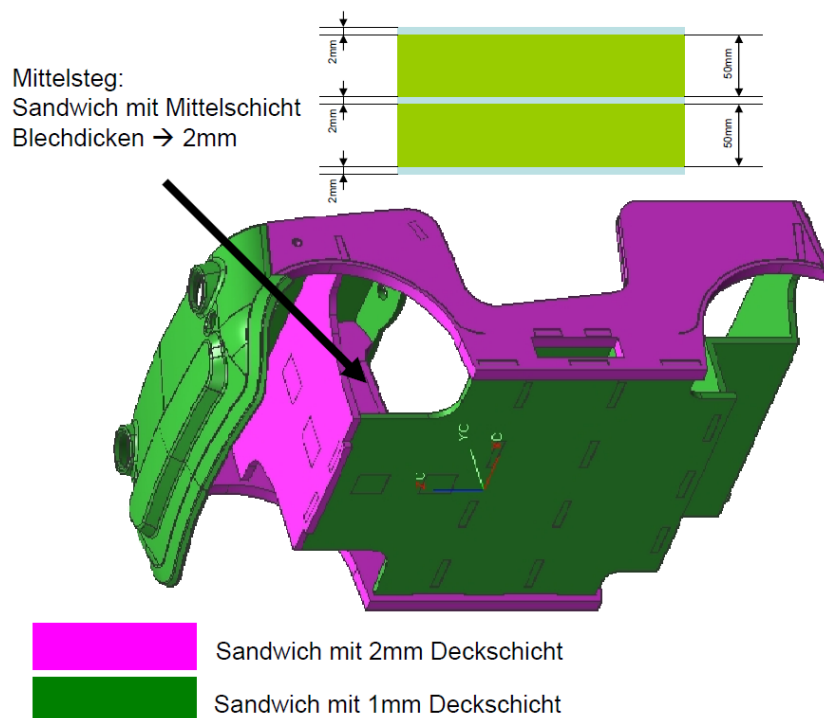


Abbildung 18: Aufbau der Sicherheitszelle ohne Radhäuser und ohne Schaumblock vor der Spritzwand als Energieabsorptionselement.

7.2. Modellbildung

Um die Materialmodelle zu validieren und eine geeignete Element- und Materialformulierung zu bestimmen, wurden einige Simulationsrechnungen an Sandwich-Probekörpern durchgeführt, welche im Vorfeld statisch und dynamisch geprüft wurden (Kapitel 4). Der Vergleich des Kraft-Weg-Verlaufs gemäss Abbildung 19 zeigt, dass mit der numerischen Simulation eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen an den Sandwich-Probekörpern erzielt werden kann.

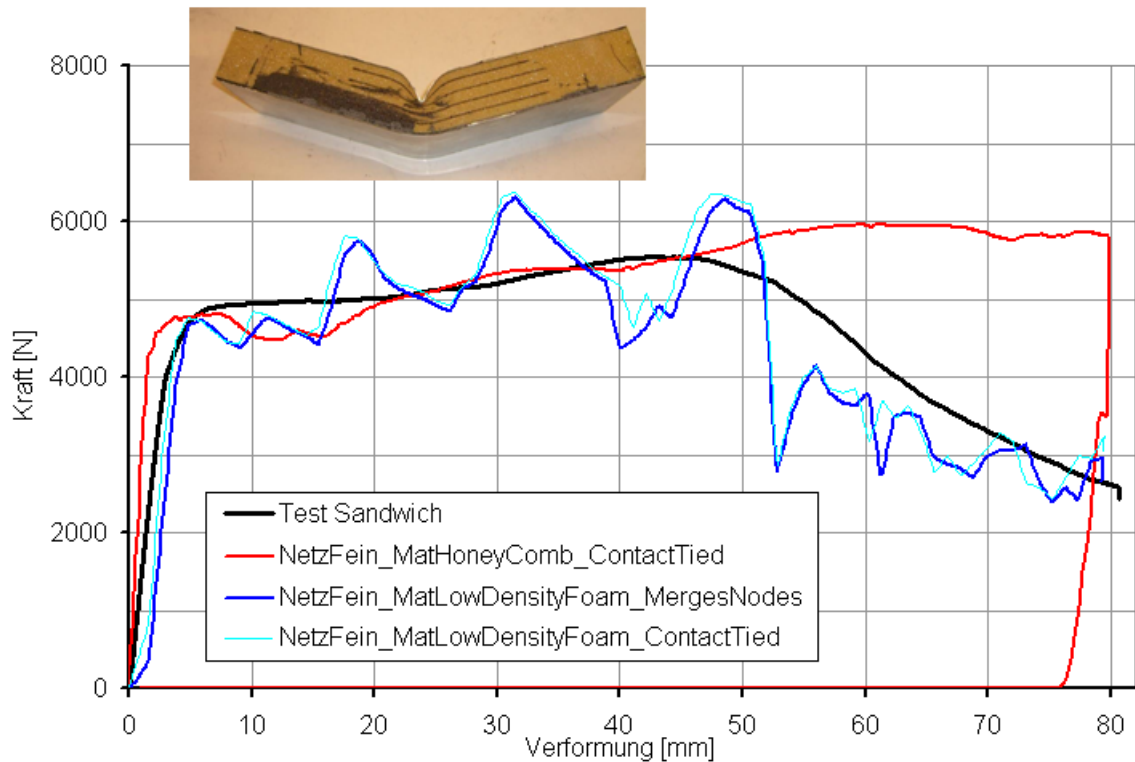


Abbildung 19: Vergleich der Resultate des Kraft-Weg-Verlaufs von Simulation und Experiment an einem Sandwich Prüfkörper.

Für die numerische Simulation wurde die Fahrzeugstruktur vereinfacht, indem lediglich die tragenden Bauteile berücksichtigt wurden (Abbildung 20). Sämtlich nicht strukturellen Verkleidungsteile, das Fahrwerk und das Interieur wurden aus Gründen der Einfachheit alleine durch Massenpunkte im Modell abgebildet.

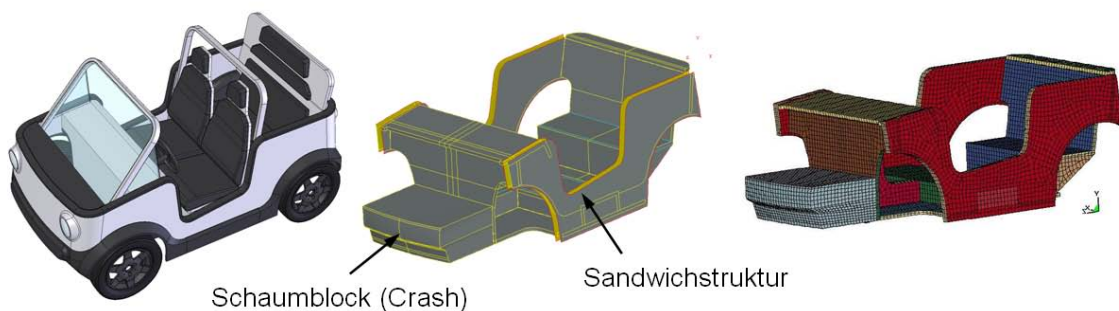


Abbildung 20: CAD-Modell des neuen Fahrzeuges (links), Vereinfachung des CAD-Modells für die Crashsimulation (mitte), Netz des FE-Modells (rechts)

Es wird folgendes Crashszenario simuliert (analog zum Crashtest):

- Frontalkollision gegen starre Barriere
- Kollisionsgeschwindigkeit: 40 km/h
- Teilüberlappung: 75%

7.3. Ergebnisse

Für den Schaumblock, der die Funktion eines Energieabsorbers im Crashfall übernimmt, wurden die Produkte Airex C70.40, C70.55 und C70.75 getestet (Abbildung 21). Die Resultate zeigen, dass bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40km/h und der geringen Masse des

Fahrzeuges, mit dem leichtesten Schaum C70.40 die besten Resultate erzielt werden. Für diesen Schaum ist der Deformationsweg ausreichend gross (Abbildung 22), um gering Beschleunigungen zu garantieren (Abbildung 23). Gleichzeitig konnte im Berechnungsmodell eine hohe Steifigkeit der Fahrgastzelle, bestehend aus Sandwichplatten, nachgewiesen werden.

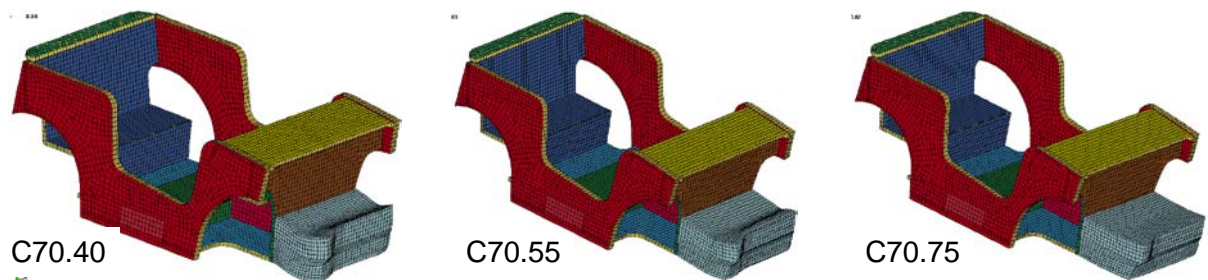


Abbildung 21: Deformationsverhalten der eingesetzten Airex-Schäume

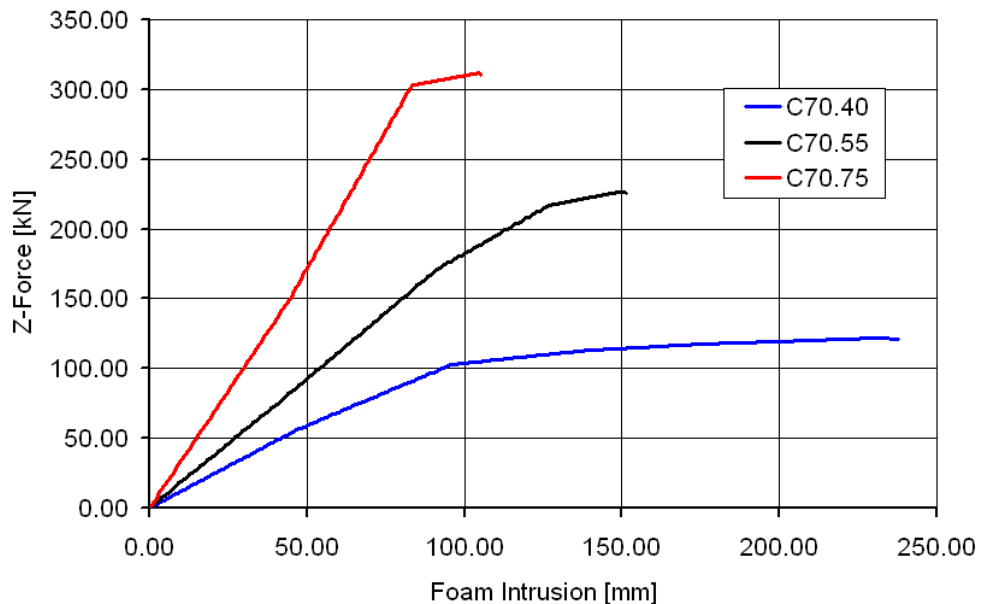


Abbildung 22: Kraft-Weg-Verlauf in Funktion unterschiedlicher Schaumdichten.

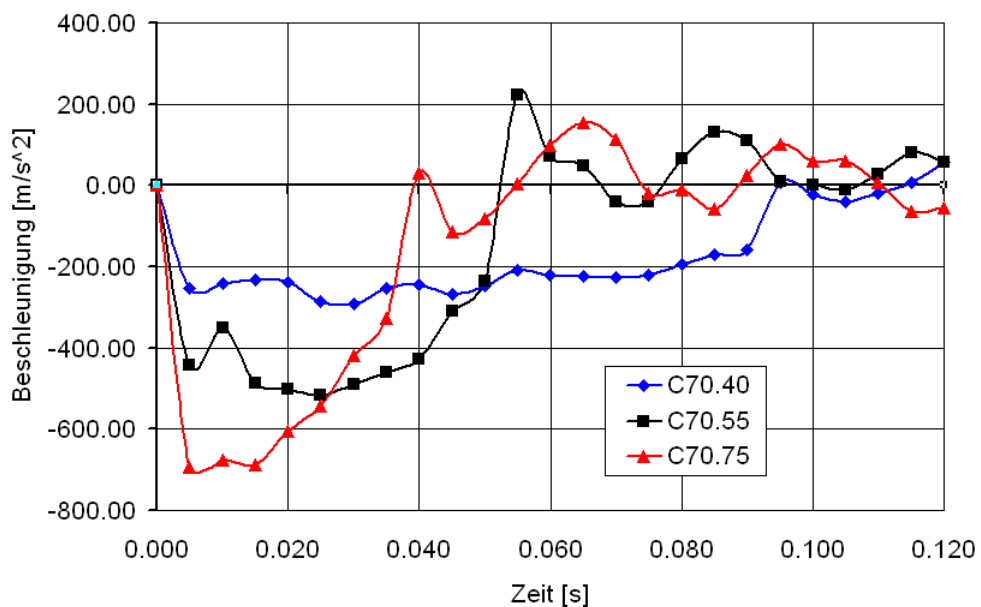


Abbildung 23: Fahrzeugverzögerung über der Crashzeit für unterschiedliche Schaumdichten.

Um das neue, mit numerischen Methoden optimierte Konzept zu überprüfen, muss ein reales Fahrzeug aufgebaut und in einem Crashversuch geprüft werden. Weitere Details sind im Bericht der Alcan Technology & Management [7] nachzulesen.

8. Schlussfolgerungen

Der Crashtest und die numerischen Simulationen haben gezeigt, dass es möglich ist, ein Fahrzeug mit äusserst geringem Gewicht und hoher passiver Sicherheit zu bauen. Die äusserst stabile Sicherheitszelle aus Sandwichelementen garantiert den Überlebensraum für die Passagiere. Folgende Komponenten tragen zusätzlich zum Insassenschutz bei:

- Zwei Überrollbügel
- Sicherheitssitze mit 3-Punkt Gurten
- Gepolstertes Armaturenbrett

9. Quellenverzeichnis

9.1. Literatur

- [1] H.-H. Braess, U. Seifert; Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg Verlag
- [2] Hardmeier Beat; Passive Sicherheit von Leichtmobilen, aktuelle Problemstellungen Zürich 1994, Nebis-Nr. 001341146
- [3] Innovativer Kfz-Insassen und Partnerschutz, ISBN 3-18-091911-6
- [4] Methodische Auslegung und Erprobung von Fahrzeug-Crashstrukturen, VDI Verlag 2002, ISBN 3-18-349612-7
- [5] Fahrzeugsicherheit 2007, innovativer Kfz-Insassen und Partnerschutz, ISBN 978-3-18-092013-9
- [6] Schneebeli R., Bruderer R.; Crashesicherheit E-Motion, Bachelorarbeit SS06, Hochschule für Technik Rapperswil HSR
- [7] Dold J., Rothe J.; Crash-concept E-Mobile; Bericht Alcan Technology&Management, IR-Nh-09-008

9.2. Gesetzgebung Crashesicherheit

http://www.admin.ch/ch/d/sr/741_41/

<http://eur-lex.europa.eu/de/index.htm>

<http://www.bmvbs.de/Verkehr/Strasse-,1446/Kfz-technische-Vorschriften.htm>

<http://www.euroncap.com/home.aspx>

http://www.carhs.de/de/training/safetywissen/crash_gesetze.php

9.3. Crash-Test

<http://www.euroncap.com/home.aspx>