

**Schlussbericht
zum InnoRegio Projekt RIO – Verbundprojekt**

Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen

Teilvorhaben: TP4

Projektpartner: AMIC Angewandte Micro-Messtechnik GmbH	Projektträger: Projektträger Jülich
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2004 – 30.06.2006	Förderkennzeichen: 03I4612D
Berichtszeitraum: 01.07.2004 – 30.06.2006	Berichtsnummer: RIO/als-ab

Bearbeiter: Dr. Hans Walter, Olaf Michel, Kerstin Kreyßig, Dr. Jürgen Auersperg
Projektleiter: Dr.-Ing. Jürgen Keller

Berlin, 03.11.2006

.....
Dr.-Ing. Jürgen Keller

Anschrift:

AMIC Angewandte Micro-Messtechnik GmbH Tel.: 030-6392-2540
Volmerstraße 9B Fax.: 030-6392-2541
12489 Berlin Email: amic.berlin@t-online.de

I.	Kurzdarstellung	3
I.1.	Aufgabenstellung.....	4
I.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
I.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
I.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	5
I.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
II.	Eingehende Darstellung	7
II.1.	Erzielte Ergebnisse.....	7
II.1.1.	Ermittlung der Materialbeschreibung für Al-Schaum-Sandwich	7
II.1.1.1	Experimentelle Belastungsprüfung, (Druckversuche, 3-Punkt- und 4-Punkt- Biegeversuche, Scherversuche).....	7
II.1.1.2	Ableitung eines numerischen Materialmodells für die FE-Simulation	20
II.1.1.3	Abschätzung notwendiger Schichtdicken	21
II.1.1.4	Optimierungsmethoden durch probabilistische Materialparametervariation der FE-Modelle	22
II.1.2.	Prüfung von Verbindungselementen, Schweißbolzen, Einnietbolzen, Einnietmutter.....	25
II.1.3.	Prüfung von diversen Schweißverbindungen	29
II.1.3.1	Biegeversuche an Al-Schaum-Sandw. Stumpfnah-Schweißverbindungen	29
II.1.3.2	Belastung von T-Stoß geschweißtem Aluschaumsandwich	31
II.1.4.	Numerische Simulationen des Frontmoduls	33
II.1.4.1	Übernahme des FE-Modells aus NASTRAN™.....	33
II.1.4.2	Simulation verschiedener relevanter Lastfälle	35
II.1.4.3	Berechnungsergebnisse der verschiedenen Lastfälle	36
II.1.4.4	Zusammenfassung der Gesamtmodellanalysen.....	39
II.2.	Nutzen / Verwertung.....	39
II.3.	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen	39
II.4.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	40
	Literaturverzeichnis.....	40

I. Kurzdarstellung

Ziel des Projektes „Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen“ war es, möglichst große crashoptimierte Frontmodule für Schienenfahrzeuge aus Metallschäumen zu entwickeln. Im Kollisionsfall müssen sie in der Lage sein, die kinetische Energie kontrolliert zu absorbieren. Des Weiteren sollte eine Gewichts- und Kostenoptimierung gegenüber dem bisherigen Frontmodul aus GFK erreicht werden.

Entsprechend ihrer Kernkompetenzen beteiligte sich AMIC an der Spezifikation wesentlicher Parameter zur Auslegung des Frontmoduls, einer umfassenden mechanischen Charakterisierung der in dem Projekt entstandenen Sandwichstrukturen und deren numerischen Beschreibung mittels Finite-Elemente-Simulation.

Ein bei der AMIC GmbH vorhandenes Simulationssystem wurde den Anforderungen von Aluminiumschaum-Sandwich Strukturen angepasst. Hierzu wurden FE-Datensätze von Bombardier Transportation übernommen und Materialdefinitionen entsprechend neu umgesetzt. So konnten probabilistische Parameterstudien zur Ermittlung von Materialgesetzen für die Materialklasse von Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen erprobt und eingesetzt werden.

Die FE-Werkstoffdaten wurden durch flankierende Prüfungen (Druckversuche, 3- und 4-Punkt-Biegeversuche, Scherversuche) von Sandwichkomponenten mit variierenden Aufschäumparametern unterstützt. Ergänzend wurden Prüfungen an Verbindungselementen (Nietmuttern, -bolzen, Schweißbolzen, Klebbolzen) und an schweißteschnisch miteinander verbundenen Sandwichstrukturen durchgeführt. Damit konnte gezeigt werden, dass die Montagefähigkeit und die Reparaturbarkeit des Frontmoduls gewährleistet werden können.

Im Abschluss konnte von der Wilhelm Schmidt GmbH ein halbes Frontmodul als Demonstrator aus Aluminiumschaum-Sandwich hergestellt werden.

I.1. Aufgabenstellung

Ziel ist es, möglichst große crashoptimierte Frontmodule für Schienenfahrzeuge aus Metallschäumen zu entwickeln. Im Kollisionsfall müssen sie in der Lage sein, die kinetische Energie kontrolliert zu absorbieren.

Bisher erlaubt nur die pulvermetallurgische Route die Herstellung von Formteilen. Weiterhin werden auch Metallschaum-Sandwichstrukturen angewendet, mit pulvermetallurgisch oder schmelzmetallurgisch hergestellten Schaumkern, die sich aufgrund der Deckbleche durch eine gute Oberflächenbeschaffenheit auszeichnen. Metallschaum-Sandwichstrukturen können ebenfalls zu Formteilen umgeformt werden.

Weiterhin zeichnen sich Bauteile aus Aluminiumschäumen durch hohe Steifigkeit bei niedrigem Gewicht aus, haben einen hohen Wirkungsgrad bei der Schallabsorption und der Eigenresonanzdämpfung sowie der Wärmeisolation. Aluminiumschäume sind vollständig recycelbar und beeinträchtigen die Umwelt nicht /26/.

Aufgrund dieser Eigenschaften sollen Frontmodule für die Schienenfahrzeuge aus Aluminiumschäumen gefertigt werden. Damit wird das Crashverhalten von Schienenfahrzeugen wesentlich verbessert. Das Crashdeformationselement ist hier durch die Schaumstruktur des Materials integraler Bestandteil des Frontmoduls, was zu weniger Bauteilen und damit zur Gewichtsreduzierung sowie zur Minimierung von Bearbeitungsoperationen führt. Weiterhin wird durch die sehr gute Schall- und Schwingungsdämpfung von Schäumen der Fahrkomfort gesteigert.

Beim Partner Bombardier Transportation wurde ein geeignetes Frontmodul ausgewählt, das bisher in GFK-Sandwichbauweise realisiert wurde. Am Beispiel des Frontmoduls des Triebwagenzuges ITINO waren Materialauswahl, Form und Aluminiumschaum- und Decklagendicke so zu bestimmen, dass eine Auslegung für den Einsatz von Aluminiumschaum konstruiert werden konnte.

Dabei wurde die Herstellung möglichst großflächiger Modulstrukturen angestrebt, um das Frontmodul aus einem Teil oder möglichst wenigen Teilen herstellen zu können. Dadurch konnte der Aufwand für das Fügen der Teile reduziert werden.

Ergebnis ist der Demonstrator eines Frontmoduls für Schienenfahrzeuge aus Aluminiumschaum, der wesentlich verbesserte Crasheigenschaften aufweist.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt war von Anfang an so angelegt, dass nur in einer thematisch und zeitlich eng verzahnten Zusammenarbeit der Projektteilnehmer und der Unterauftragnehmer ein optimales Ergebnis erzielt werden konnte. Das Projektkonsortium bestand aus den Unternehmen Wilhelm Schmidt GmbH als Hersteller der Frontmodule und Bombardier Transportation GmbH, die die Frontmodule zukünftig in Schienenfahrzeuge einbaut, sowie der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus als begleitende Forschungsstelle und der AMIC GmbH. Die AMIC war im Konsortium für die Durchführung von Simulationsrechnungen zur Auslegung des Frontmoduls und für Materialuntersuchungen zuständig. Die Materialuntersuchungen wurden sowohl an reinen Aluminiumschaum-Sandwiches mit variierenden Herstellungsrandbedingungen als auch an fügetechnisch hergestellten Versuchsmustern und Komponenten der Verbindungstechnik durchgeführt. Dabei kamen Prüfgeräte der AMIC und deren Unterauftragnehmer zum Einsatz. Die Ergebnisse wurden in regelmäßig stattfindenden Projekttreffen an die Konsortialpartner weitergegeben.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Zunächst sind im Lasten- / Pflichtenheft des Frontmoduls in Anlehnung an die GFK Bauweise die Anforderungen der Firma Bombardier Transportation an das geplante Frontmodul festgelegt worden.

Zur Bauteilauslegung wurden Simulationsuntersuchungen bezüglich des Bauteilverhaltens von der AMIC GmbH durchgeführt. Hierzu wurden bei Bombardier vorhandene FE-Modelle in der AMIC zur Verfügung stehende Softwarecodes umgesetzt. Bei der Bauteilauslegung wirkte das Fraunhofer IFAM bezüglich der Eignung aus schaumtechnischer Sicht mit.

Es wurden erste Umformversuche an einer Probegeometrie aus Aluminiumschaum-Sandwich durchgeführt. Hierbei wurden die kritischen Formelemente, die aus der Form des Frontmoduls abgeleitet wurden, mit berücksichtigt, um Aufschluss über die Herstellbarkeit zu geben. Zur Herstellung der Probegeometrie wurden entsprechende Werkzeuge von der BTU Cottbus hergestellt. Hieran wurden die Prozesstechnologie, wie die Schäumparameter und die minimal zu fertigenden Radien erprobt und optimiert.

Als weiterer Schritt wurde ein Frontmodulesegment entwickelt und erprobt. Die kritischen Formelemente waren hier enthalten. Durch diese Versuche wurden Erkenntnisse über die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Herstellung von Frontmodulen aus Aluminiumschaum-Sandwich abgeleitet und gewonnen. Einzelheiten hierzu sind in den Projektberichten von Wilhelm Schmidt und der BTU Cottbus diskutiert.

Es sind Verfahren zum Fügen der Frontmodulesegmente entwickelt und erprobt worden. Weiterhin wurden Untersuchungen zu Reparaturverfahren durchgeführt. Die Aufgabe der AMIC bestand hierbei in der Prüfung der realisierten schweißtechnischen Verbindungen und der erprobten Verbindungselemente (Nietmuttern, Einnietbolzen, Schweißbolzen, Klebeverbindungen).

Durch Simulationsuntersuchungen der AMIC GmbH wurden Schwachstellen am Frontmodul schon in der Phase der Produktentwicklung festgestellt. Hierdurch sollte vermieden werden, teure Testmuster herstellen zu müssen. Ein bei der AMIC GmbH vorhandenes Simulationssystem wurde den Anforderungen von Aluminiumschaum-Sandwich angepasst. Des Weiteren wurden die Möglichkeiten probabilistischer Parameterstudien zur Ermittlung von Materialparametern für die Materialklasse von Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen erprobt. Im Ergebnis wurden die Werkstoffkennwerte des verwendeten Aluminiumschaum-Sandwiches für die Simulation und Bauteilauslegung ermittelt.

Nach der endgültigen Gestaltung erfolgte die Fertigung eines Demonstrators aus Aluminiumschaum-Sandwich, welcher alle wesentlichen Elemente des Frontmoduls beinhaltet.

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Aluminiumschäume sind eine interessante, noch junge Werkstoffalternative für Anwendungen bei denen herkömmliche Aluminiumlegierungen auf Grenzen stoßen, wenn beispielsweise eine noch geringere Dichte oder ein erhöhtes Stoßabsorptionspotenzial gefordert wird. Die Schäume zeigen eine gute Dämpfung und sind formstabil.

Metallschäume werden bisher kaum in Produkten industriell angewandt. Dies liegt daran, dass es für Anwendungen noch Forschungsanstrengungen bezüglich Bauteilgestaltung und Herstellung bedarf. Auch mangelt es dem Konstrukteur noch an Daten, um gute Lösungen zu konzipieren. Als Erfolg versprechende Methoden haben sich vor allem schmelz- und pulvertechnologische Prozesse erwiesen. Bei der schmelzmetallurgischen Herstellung wird ein Blasenbildungsmittel in eine Aluminiumschmelze eingebracht und der entstehende

Schaum stabilisiert. Bei der pulvermetallurgischen Aluminiumschaumerzeugung bildet das in die Matrix eingeschlossene Blasenbildungsmittel bei Erwärmung des festen Ausgangsmaterials die Poren und somit den Schaum. Nachteil der schmelzmetallurgischen Verfahren ist die eingeschränkte Möglichkeit, komplexe Formteile herzustellen.

Für die Herstellung von Formteilen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Im einfachsten Fall wird das pulvermetallurgisch hergestellte Halbzeug vor dem Aufschäumen durch Walzen, Tiefziehen, Schmieden oder Strangpressen umgeformt. Auf diese Weise können neben geformten Blechen auch Profile, Stangen und komplexere Teile entstehen. Solange die Umformtemperatur unterhalb der Aufschäumtemperatur bleibt, ist ein vorzeitiges Aufschäumen nicht zu erwarten. Teile mit relativ komplizierten Geometrien lassen sich realisieren wenn die Halbzeuge in einer Form aufgeschäumt werden.

Durch Kombinieren von Aluminiumschaumlagen mit Deckblechen entstehen Leichtbau-Sandwichverbunde. Die Deckbleche werden durch Walzplattieren mit dem aufschäumbaren Halbzeug verbunden.

Die Aluminiumschäume lassen sich auch schneiden, bohren, sägen, lackieren. Mit anderen Teilen können sie durch Schrauben, Löten oder Laserschweißen verbunden werden. Vorteile der Aluminiumschäume sind Erhöhung der Crashsicherheit, Lärmdämpfung und Gewichtseinsparung.

In der Automobilindustrie sind erste Prototypanwendungen bekannt /25/,/26/. Die Wilhelm Karmann GmbH hat mit ihrer Studie „Aluminium Foam Body“ ein interessantes Prototypenkonzept mit Sandwichs für tragende Teile der Karosserie und in Crashzonen in Front und Heck vorgestellt. Bei Triebwagen für Vorortzüge wurden die Vorderpuffer, die bisher aus Gummi oder gummibeschichteten Stahlhohlkörpern bestehen, durch Puffer aus Aluminiumschaum ersetzt /27/. Im Bereich Frontmodule für Schienenfahrzeuge sind bisher keine Anwendungen bekannt.

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusätzlich zu der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde zur Durchführung bestimmter Aufgaben auf das Know-How und den Maschinenpark bzw. Analysegeräte folgender weiterer Partner zurückgegriffen:

1.	Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH	Verformungsanalysen an Aluminiumsandwichproben
2.	Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration	Werkstoffanalytische- und mechanische Untersuchungen an Aluminiumschaum-Sandwich-Verbunden
3.	Westsächsische Hochschule Zwickau	Probenkonditionierung für mechanische Untersuchungen an Aluminiumsandwiches
4.	SIVUS gGmbH	Fertigung von Biege- und Zugproben für die Werkstoffprüfung
5.	PREVAC GmbH	Fertigung von Druckplatten zur Belastung von Aluminiumsandwiches

II. Eingehende Darstellung

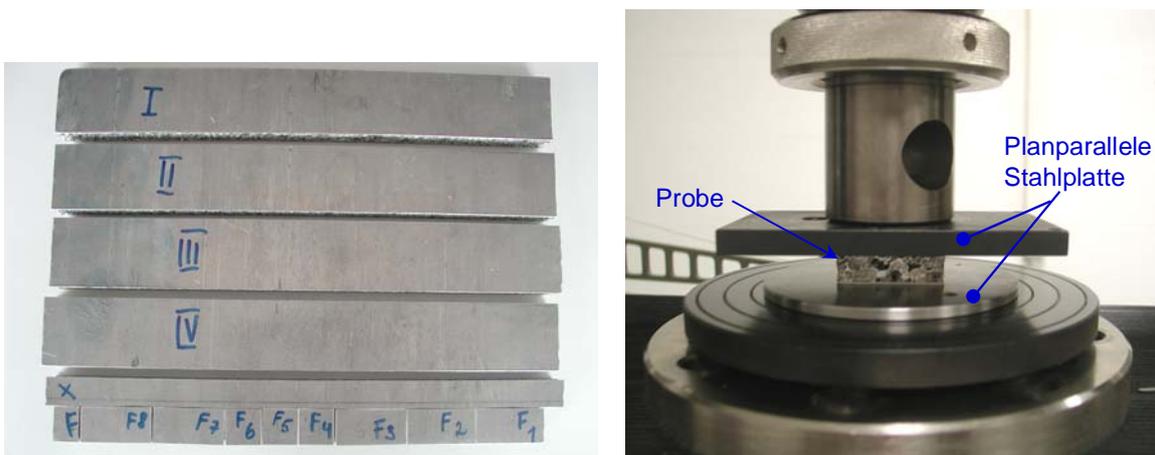
II.1. Erzielte Ergebnisse

Die im Projekt in Absprache mit den Projektpartnern durchgeführten Untersuchungen zur Realisierbarkeit des Frontmoduls auf Basis von werkstoffmechanischen Prüfungen und Finite-Elemente-Analysen (FEA) werden im Folgenden dargestellt. Dabei liegt der Fokus auf der Beurteilung der im Projekt generierten Sandwichverbund-Demonstratoren hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz am BT Triebwagenzug „ITINO“. Ausgehend von dem mechanischen Verhalten eines in GFK-Verbund-Bauweise realisierten Frontmoduls, das virtuell mittels FEA abgebildet wurde, und ersten werkstoffmechanischen Belastungstests an Aluminium-Schaum-Verbunden konnten bereits in der Anfangsphase des Projekts Dimensionierungsrichtlinien festgelegt werden. Im weiteren Verlauf wurden durch flankierende Prüfungen (Druckversuche, 3- und 4-Punkt-Biegeversuche, Scherversuche) optimale Aufschäumparameter für den Verbund ermittelt als auch für die Finite-Elemente-Berechnung geeignete Materialmodelle generiert. Ergänzend wurden Prüfungen an Verbindungselementen (Nietmuttern, -bolzen, Schweißbolzen, Klebbolzen) und an schweißteschnisch miteinander verbundenen Sandwichstrukturen durchgeführt. Damit konnte gezeigt werden, dass die Montagefähigkeit und die Reparaturbarkeit des Frontmoduls gewährleistet werden können.

II.1.1. Ermittlung der Materialbeschreibung für Al-Schaum-Sandwich

II.1.1.1 Experimentelle Belastungsprüfung, (Druckversuche, 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeversuche, Scherversuche)

Zur Bestimmung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Aluminium-Sandwich-Verbunden wurden im Laufe des Projekts verschiedene Chargen in Plattenform hergestellt und AMIC zur Prüfung übergeben /1/,/2/. Abb. 1 zeigt bereits in Prüfkörper getrenntes Plattenmaterial vom Fraunhofer IFAM der Abmessung 290mm×210mm×16mm. Die beidseitigen Decklagen sind bei dieser Charge 1mm dick. Der Verbund wurde durch Walzplattieren ohne zusätzlichen Klebstoff oder Haftvermittler hergestellt. Die Decklagen bestehen aus einer niedriglegierten AlMgSi-Legierung mit einer Kernlage aus AISi6Cu6.



**Abb. 1: a) Geschäumtes Sandwich von FhG IFAM Proben für Biege- und Druckversuche
b) Probenanordnung im Druckversuch in TIRATEST 28100**

Mittels Sägen und Fräsen wurden Biegeproben der Abmessung 290mm×40mm und Druckproben mit einer Fläche von 20mm×20mm, 20mm×40mm und 40mm×40mm, hergestellt Abb. 1.

Druckversuche an Sandwichverbunden

Die Druckversuche wurden in einer Universalprüfmaschine TIRATEST 28100 durchgeführt, wobei die Proben uniaxial in Dickenrichtung belastet wurden, Abb. 1. Dabei wurde die Kraft in Abhängigkeit von der Verschiebung der Lasttraverse aufgezeichnet. In Abb. 2 sind ausgewählte Belastungskurven dargestellt, die für die Generierung eines Materialmodells verwendet wurden (vgl. auch Abb. 22).

Der Vergleich unterschiedlicher Lastflächen zeigt, dass sich insbesondere bei den kleinen Probengrundflächen Unregelmäßigkeiten in der Porosität stärker auf das $\sigma_{\text{druck}}-\varepsilon_{\text{druck}}$ Diagramm auswirken /1/. Der Einfluss der Porosität und deren lokalen Struktur auf den $\sigma_{\text{druck}}-\varepsilon_{\text{druck}}$ -Verlauf nimmt mit größer werdender Druckfläche ab. Deshalb wurde für nachfolgende Untersuchungen eine Druckfläche von 40 mm x 40 mm gewählt. Die $\sigma_{\text{druck}}-\varepsilon_{\text{druck}}$ -Verläufe der 40 mm x 40 mm Proben sind in Abb. 2 dargestellt. Typisch für alle Kurven ist unabhängig von der Probenfläche der steile Spannungsanstieg zu Versuchsbeginn und eine ausgeprägte Plateauphase bis ca. 50 % Dehnung. Infolge der erreichten Verdichtung nach ca. 50 % Dehnung erfolgt dann wieder ein deutlicher Anstieg der Spannung. Die gemessenen Druckspannungs-Dehnungs-Verläufe stimmen qualitativ gut mit den Ergebnissen in /15/, /19/, /21/, überein. Weitere Ergebnisse eigener Messungen sind in /22/ zusammengefasst.

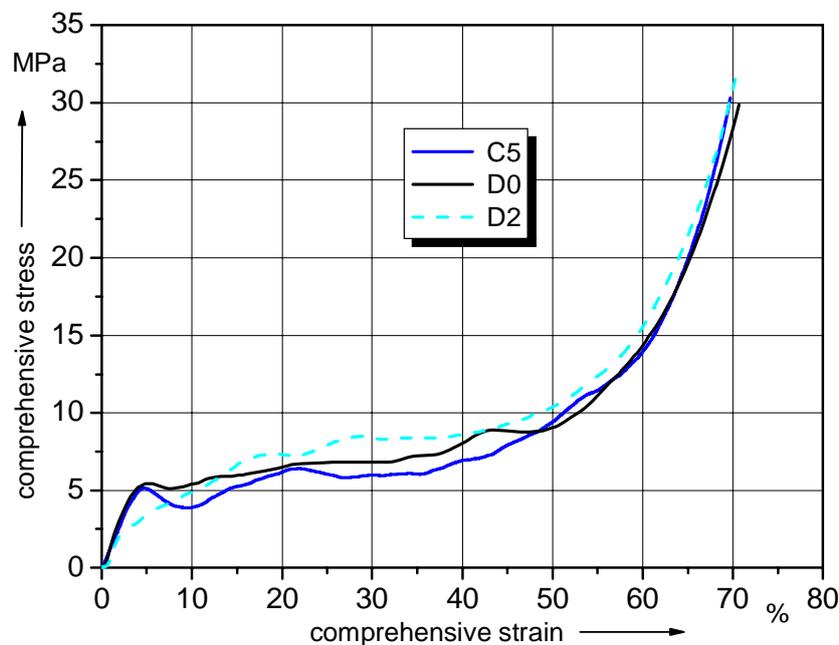


Abb. 2: Spannungs-Dehnungs-Verlauf an 40 mm x 40 mm Proben bei $v^{\text{trav}} = 5 \text{ mm/min}$

An dieser Charge wurden zusätzlich Versuche zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Spannungs-Dehnungs-Kurven von der Belastungsgeschwindigkeit realisiert (Traversengeschwindigkeit 5, 200, 500 mm/min). Es wurden bei diesen Belastungsgeschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede im Druckspannungs-Dehnungs-Verlauf festgestellt /1/.

An einer weiteren Versuchsreihe wurden Druckversuche mit Probekörpern der Alm GmbH, die im Walzplattierverfahren hergestellt wurden durchgeführt (Probenabmessung 40mm×40mm×26 mm). Dabei kamen Decklagen aus einer AlMn1-Legierung mit der Stärke von 1,5 mm zum Einsatz. Abb. 3 zeigt die prinzipielle Schaumstruktur vor dem Druckversuch, wobei sich die Probe mit der Bezeichnung ho-02-54 durch eine gröbere Schaumstruktur auszeichnet. Bei der zur Verfügung gestellten Platte sind lokale Schwankungen in der Schaumstruktur vorhanden.

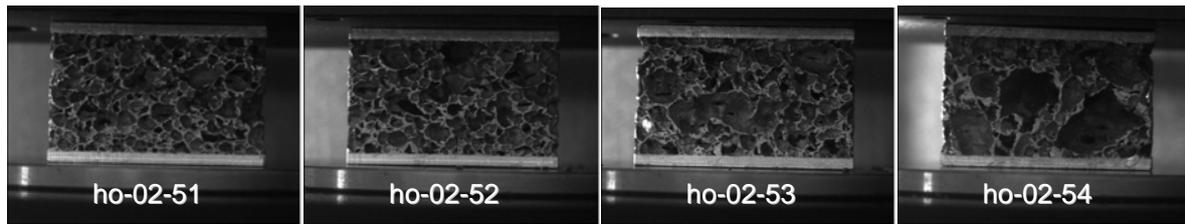


Abb. 3: Druckversuche an Al-Schaum-Sandwich, Schaumstrukturen im Ausgangszustand

Die Ergebnisse der durchgeführten Druckversuche sind in Abb. 4 zusammengefasst. Es fällt auf, dass die Probe mit der größeren Zellenstruktur als Ausreißer hinter den Werten der anderen Versuche zurückbleibt.

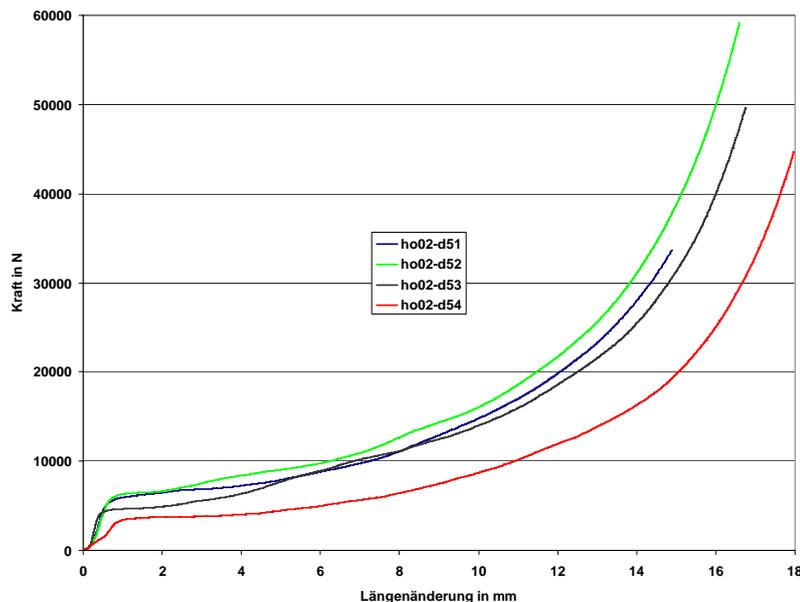


Abb. 4: Kraft-Traversenweg

Die gemessenen Werte an den „Alm“-Aluminium-Schaumverbunden zeigen weniger starke Schwankungen im Kraftverlauf als die vom IFAM zur Verfügung gestellten Chargen, bewegen sich aber in der gleichen Größenordnung. Bei diesen Versuchen zeigt sich die Bedeutung einer homogenen und nicht zu groben Schaumstruktur für das mechanische Verhalten.

Einsatz der Grauwertkorrelationsmethode zur Deformationsmessung an Aluschaum-Sandwichverbunden

Die im Projekt untersuchten Aluminiumschaum-Sandwich-Verbunde sind hervorragend zur Deformationsanalyse mittels Grauwertkorrelation geeignet. Die Arbeiten hierzu wurden in Zusammenarbeit mit der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH durchgeführt. Im Folgenden wird die Methode kurz erläutert und die erfolgreiche Anwendung auf Druck- und Biegeversuche wird anhand von Beispielen dokumentiert. Insbesondere zur Realisierung eines Scherversuchs zur Bestimmung der Scher-Moduls der Kernlage wurde diese optische nicht kontaktierende Methode in Analogie zur DIN 53294, /3/, im Verlauf des Projektes erfolgreich genutzt (vgl. Abb. 17).

Die *digitale Bildkorrelation* (Kreuzkorrelation in digitalen Bildern, auch: Grauwertkorrelation) wird erfolgreich als zerstörungsfreies und berührungsloses optisches Feldmessverfahren für Deformationen und Verschiebungen genutzt (/23/,/24/). Sie beruht auf der Erfassung von (wenigstens zwei) Videobildern und deren Vergleich mittels spezieller Algorithmen, deren wesentlicher Bestandteil die Kreuzkorrelationsberechnung zwischen lokalen Bildbereichen darstellt.

Um die relative Verschiebung eines Messpunkts im Vergleichszustand gegenüber dem Ausgangszustand zu bestimmen, wird im Vergleichsbild in der lokalen Umgebung bestimmter Messpunktkoordinaten derjenige Bildbereich gesucht, der dem Bildmuster in der Messpunktumgebung des Ausgangsbilds am ähnlichsten ist.

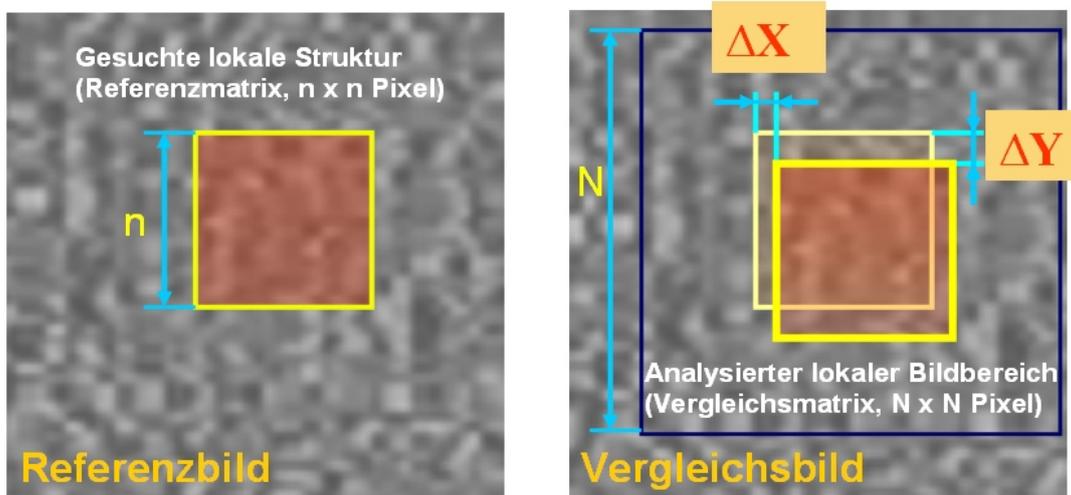
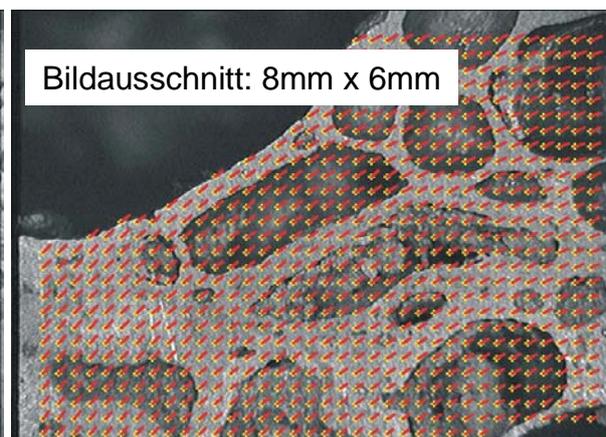
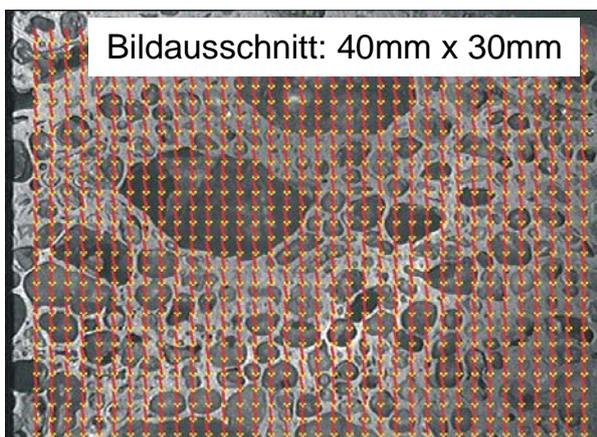


Abb. 5: Prinzip der Grauwertkorrelation zur Messung von Deformationsfeldern

Um die Lage des lokalen Bildmusters zu finden, das mit dem gesuchten Referenzmuster am besten übereinstimmt, gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. Als besonders geeignetes Ähnlichkeitsmaß für den Vergleich zwischen lokalen Bildmatrizen hat sich der aus der mathematischen Stochastik bekannte Kreuzkorrelationskoeffizient K herausgestellt. Der Korrelationskoeffizient stellt ein Maß für den linearen funktionalen Zusammenhang zwischen zwei Scharen von Messwerten dar. Am Punkt an dem der Kreuzkorrelationskoeffizient seinen Maximalwert erreicht, stimmen Ausgangsmatrix und Vergleichsmatrix am besten überein.

Aus dem beschriebenen Ansatz kann also mit einer Fülle von Submatrizes aus verschiedenen Bereichen eines Bildes ein komplettes Verschiebungsfeld berechnet werden. In Abb. 5 sind exemplarisch Querschnitte von Aluminiumschaum in verschiedenen Vergrößerungen dargestellt, wie sie in einem typischen Druck- oder Biegeversuch mit einer Kamera erfasst werden. In der Vordergrundebene der Bilder sind die aus einem Druckversuch ermittelten Deformationen in Vektordarstellung abgebildet. Mittels der ermittelten Verschiebungen und deren Ableitung (Dehnung) lassen sich Schwachstellen der Struktur ermitteln ohne dass eine in der jeweiligen Auflösung sichtbare Schädigung vorhanden ist. Dies wird durch einen Subpixelalgorithmus gewährleistet, der eine Verschiebungsmessungsauflösung von etwa 0.1 Pixel ermöglicht. Weitere Möglichkeiten der Grauwertkorrelation ergeben sich aus der Erfassung der kompletten Biegelinie (vgl. hierzu Abb. 7).



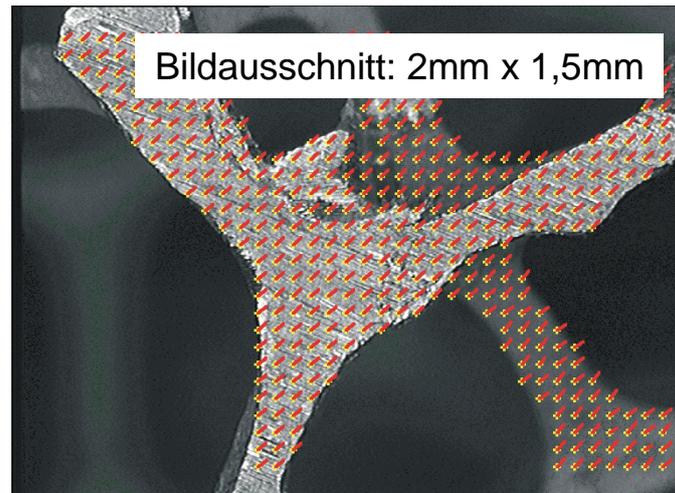


Abb. 6: Deformationsfelder an verschiedenen Bildausschnitten; Vektordarstellung

Biegeversuche an Aluminiumschaum-Sandwich

Biegeversuche an den bereits erwähnten Verbunden der Alm GmbH (vgl. Abb. 3) wurden im 3-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Die Versuche wurden neben der Auswertung der Kraft-Durchbiegungs-Daten mit korrelationsbasierten Deformationsmessungen bewertet. In Abb. 7 sind Nahaufnahmen am mittleren Stempel der Biegeeinrichtung mit den dazugehörigen Deformationen als Netzgrafik für die verschiedenen Proben dargestellt.

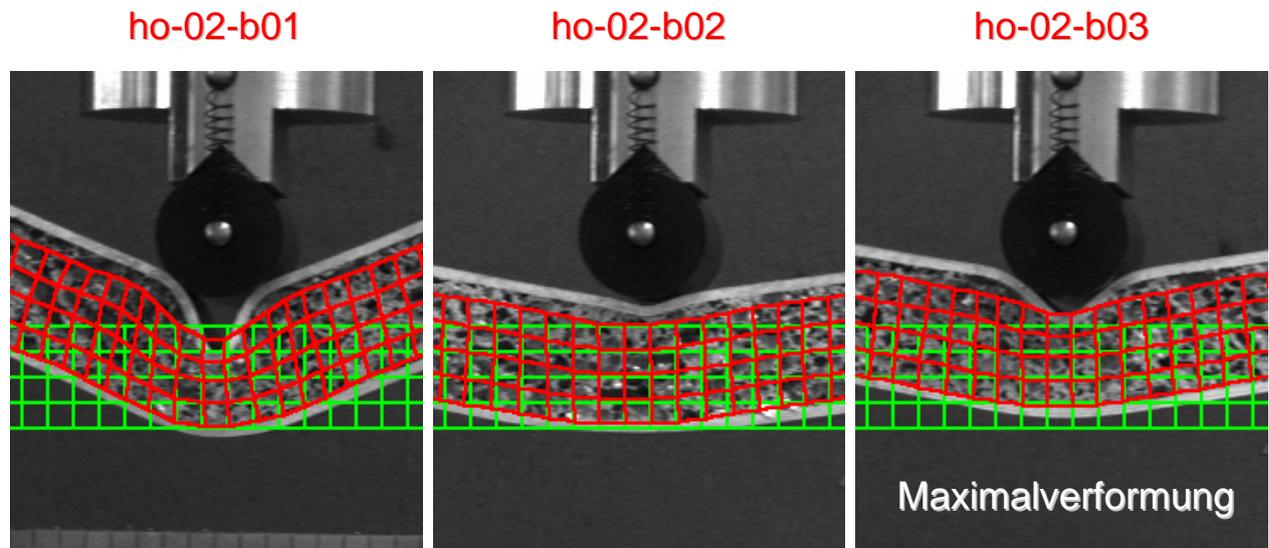


Abb. 7: Deformation an der Auflagerrolle des 3PB-Versuchs; Lokale Deformationen ermittelt mittels Grauwertkorrelation; Ausgangsnetz und deformiertes Netz

Wie in Abb. 7 dargestellt, kommt es bei einer derart lokalen Lasteinleitung bei gleichzeitig dünnen Decklagen unter Umständen zum Versagen der Decklage bevor eine Schadensakkumulation im Schaum auftritt. Dieses Versagen der Decklage führt zu einem verfrühten Kraftabfall während des Biegeversuchs (vgl. Proben b01 und b03, Abb. 8).

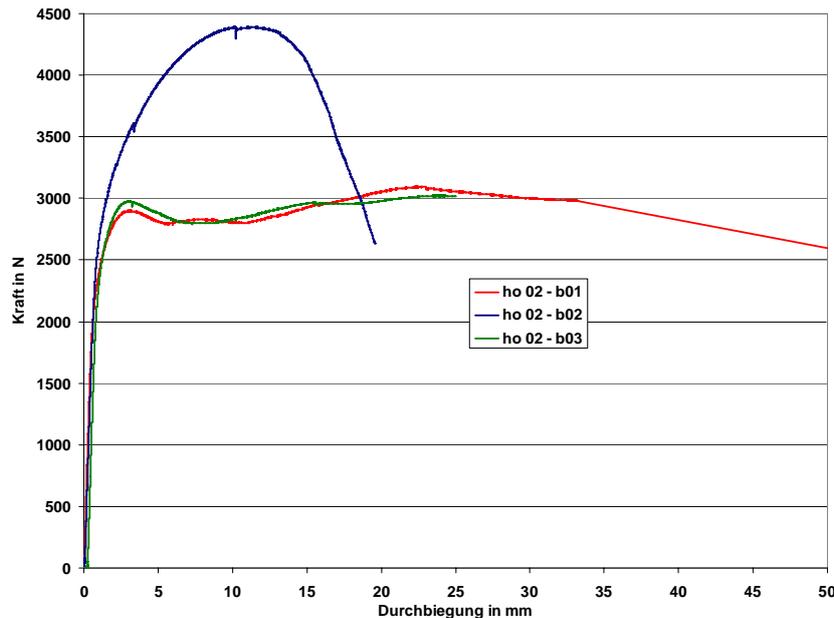


Abb. 8: Kraft-Durchbiegungskurven für 3PB-Versuche

Dieses Verhalten führt zu einer Unterschätzung der eigentlichen Biegefestigkeit, die bei Schaumversagen in größeren Bereichen, wie er in der Probe b02 auftritt, höher ausfällt.

Bezug nehmend auf die hier vorgestellten korrelationsbasierten Verschiebungsmessungen an den durchgeführten Druck- und Biegeversuchen lassen sich folgende Aspekte hervorheben:

- Außerordentlich erfolgreiche Nutzung des uniDAC-Verfahrens der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH bei der Visualisierung und Quantifizierung des Verformungsprozesses
- quantitative Erfassung des globalen und lokalen Stauchverhaltens realisiert
- Visualisierung lokaler Effekte
- Bestimmung der Biegelinie realisiert

Festigkeitsprüfung von Druck- und Biegeproben aus Aluschaum-Sandwich-Verbunden verschiedener Dicken 26,30 und 34 mm

Durch die Anpassung des mechanischen Verhaltens (Biegesteifigkeit) an die derzeit im projektrelevanten Schienenfahrzeug (Itino) eingesetzte GFK-Sandwich-Bauweise wurde zunächst eine Al-Schaumdicke von 20 mm bei einer Decklagenstärke von 3 mm angestrebt (vgl. FE-Analysen Jahresbericht 2004 /1/). Im weiteren Verlauf des Projekts legte sich dann das Konsortium auf eine Gesamtdicke von 30 mm fest, und das entsprechende Ausgangsmaterial wurde durch die Wilhelm-Schmidt GmbH bezogen. Das Material wurde dann einer detaillierten Prüfung hinsichtlich der erreichbaren Steifigkeiten und Festigkeiten unterzogen. Dazu wurde insbesondere die Abhängigkeit des mechanischen Verhaltens vom Aufschäumgrad im 3PB-, 4PB- und Druckversuch geprüft. In Abb. 9 sind ausgewählte Ergebnisse der 3PB-Versuche für drei verschiedene Aufschäumgrade mit realisierten Gesamtsandwichdicken von 26, 30 und 34 mm dargestellt. Die Sandwichdicken von 26 und 30 mm wurden durch entsprechende Wegbegrenzung realisiert, während es sich bei Platten der Dicke von 34 mm um eine freie Aufschäumung handelt.

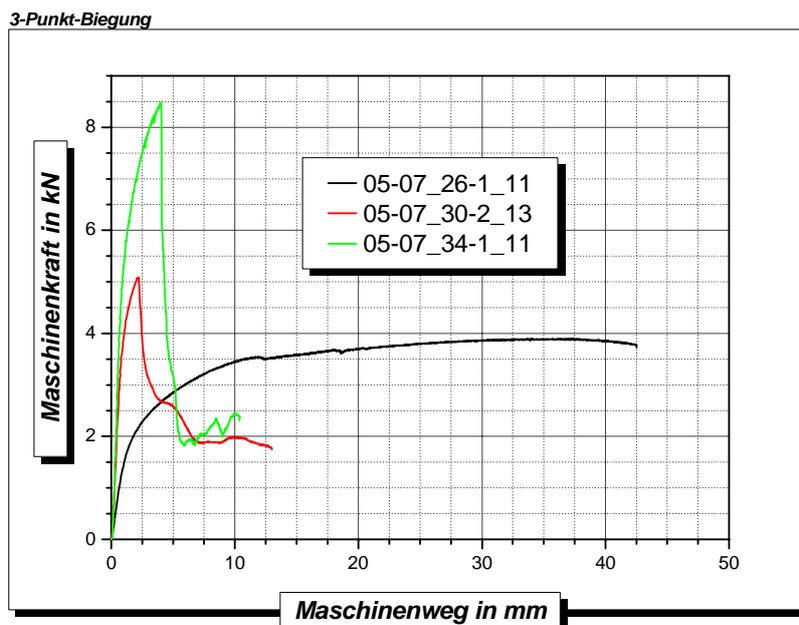


Abb. 9: Ausgewählte 3PB Kraft-Weg Kurven für 26, 30 und 34mm Sandwich-Gesamtdicke

Abb. 10 und Abb. 11 veranschaulichen die verschiedenen Versagensformen der 4PB-Versuche und Abb. 12 fasst ausgesuchte Messkurven der untersuchten Verbunde zusammen.

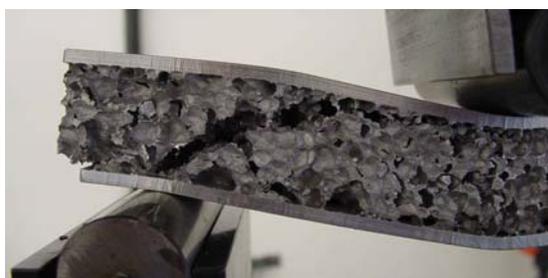
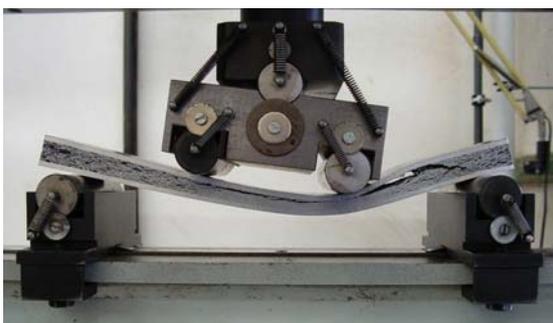


Abb. 10: 4PB Versuch, (links) 26 mm Sandwichdicke, (rechts) 30 mm Sandwichdicke



Abb. 11: 4PB Versuch, 34 mm Sandwichdicke

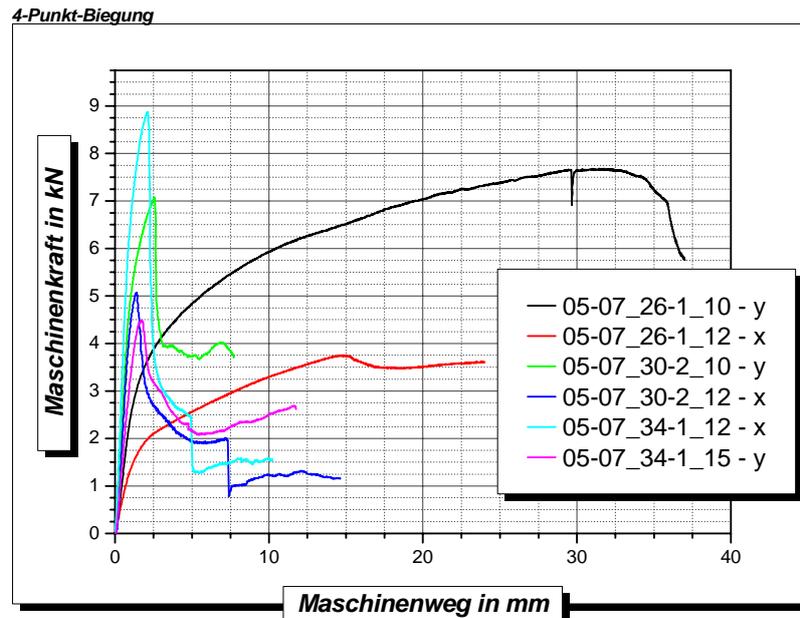


Abb. 12: Ausgewählte 4PB Kraft-Weg Kurven für 26, 30 und 34mm Sandwich-Gesamtdicke

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus den 3- bzw. 4PB-Versuchen ableiten:

- Die Kraft-Durchbiegung-Kurven streuen in einem vergleichsweise weiten Bereich.
- Das Sandwichmaterial mit der Dicke 26 mm verfügt über einen ausgedehnten „plastischen“ Bereich und zugehöriger großer Verformung. Die dickeren Proben erreichen bei einer wesentlich geringeren Durchbiegung das Lastmaximum und verzeichnen einen vergleichsweise steilen Lastabfall. Die Maximallasten liegen bei 30 mm Sandwichdicke im Vergleich zu 34 mm enger beieinander.
- Die ertragbaren Lasten (Momente) hängen sehr stark von der Lage der Proben (x- und y-Richtung) im Halbzeug ab. Dabei sind „Inhomogenitäten“ im Schaum und nur ungenügender Verbund zwischen Schaum und Decklage als Initialstellen für das Versagen anzusehen.
- Ausgangspunkt für die Schädigung der Proben während des Versuches waren häufig eine Konzentration von Fehlstellen (Bereiche erhöhter Porosität, Bereiche verminderten Zusammenhaltes) bzw. eine ungenügende Verbindung zwischen Deckschicht und Alu-Schaum (stellenweise gar keine Verbindung). Diese dominieren dann das Verformungsverhalten bei stark reduzierter Last.
- Die Schädigung der Proben erfolgte in keinem Fall im Bereich des maximalen Biegemomentes (4PB) sondern stets im Bereich zwischen unterem und oberem Lager (durch Überlagerung von Biege- und Schubspannung).
- Insgesamt ist die Festigkeit der untersuchten Proben (30 und 34 mm Gesamtdicke) für den Anwendungsfall im Schienenfahrzeug ausreichend.

Zum Abgleich der Materialparameter auch im Hinblick auf die durchzuführenden Finite Elemente Berechnungen wurden neben den Biegeversuchen Druckversuche an den drei verschiedenen Chargen (34, 30, 26 mm) durchgeführt. In Abb. 13 sind exemplarisch Druckproben nach der Prüfung dargestellt.

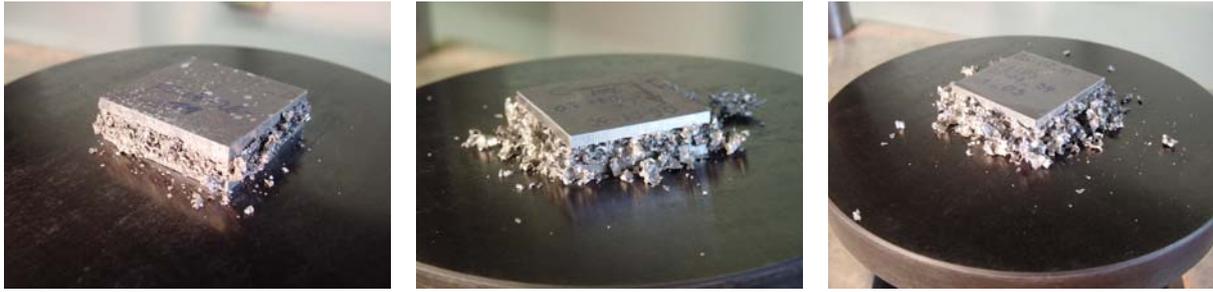


Abb. 13: Druckversuch, 26mm, 30mm und 34 mm Sandwichdicke

Abb. 14 fasst typische Druckspannungs-Dehnungsverläufe in einem Diagramm zusammen. Zusammenfassend lassen sich folgende Punkte aus dem beobachteten Materialversagen und den Messkurven ableiten:

- Für alle drei Halbzeuge wurde ein „Ausbröseln“ des Alu-Schaums während des Versuches festgestellt; dieser Effekt verstärkt sich mit abnehmender Dichte (größere Schaumhöhe).
- Die erreichbaren Dehnungen steigen mit abnehmender Dichte; wobei die Unterschiede bei den Halbzeugen geringerer Dichte kleiner sind.
- Die Druckspannungs-Dehnungskurven bei einer Gesamtsandwichdicke von 30mm sind gut reproduzierbar und streuen deutlich weniger als bei den anderen beiden, da der Schaum vergleichsweise homogen ausgebildet ist.

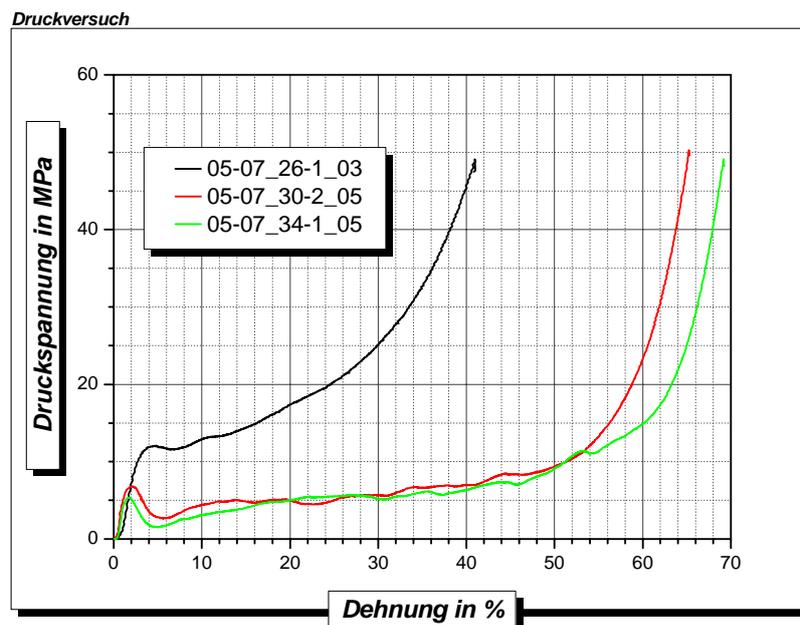


Abb. 14: Ausgewählte Druckspannung-Weg Kurven für 26, 30 und 34mm Sandwich-Gesamtdicke

4.3-PB-Prüfung an Aluschaum-Sandwich-Verbunden mit verbessertem Aufschäumprozess auch für Sandwichdicken im Bereich von 25 mm

Aufgrund konstruktiver Randbedingungen am Frontmodul wurden im Projektverlauf insbesondere bei der Dachkonstruktion Sandwichverbunde mit Dicken im Bereich von 20 mm gefordert. Einzelheiten hierzu sind in den Berichten der BTU Cottbus und Wilhelm Schmidt erläutert. Aufgrund der Prüfergebnisse an nicht vollständig aufgeschäumten Verbunden (26 mm Prüflinge in Abb. 9 und Abb. 12) wurden Verbesserungen der

Schaumqualitäten durch Parametervariationen während des Aufschäumprozesses realisiert. Die so hergestellten Verbundplatten wurden wiederum durch 3- und 4-Punkt-Biegeprüfung charakterisiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 15, Abb. 16 dargestellt.

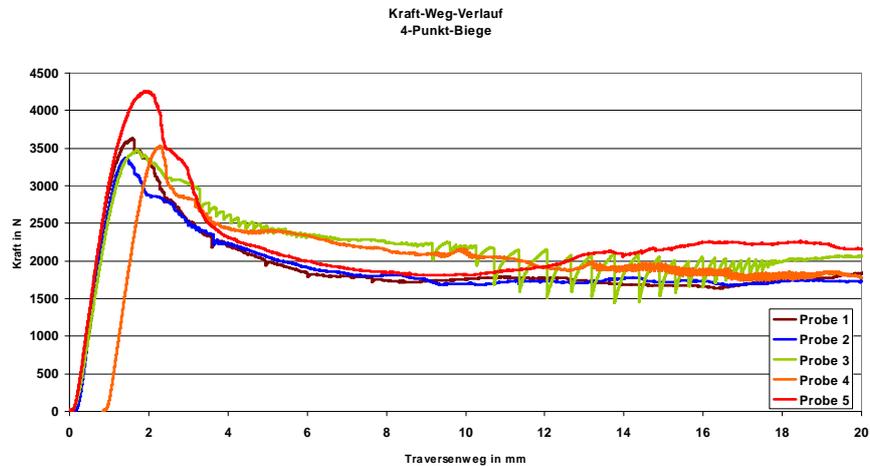


Abb. 15: Kraft-Weg Kurven der 4-PB für 25mm Sandwich-Gesamtdicke

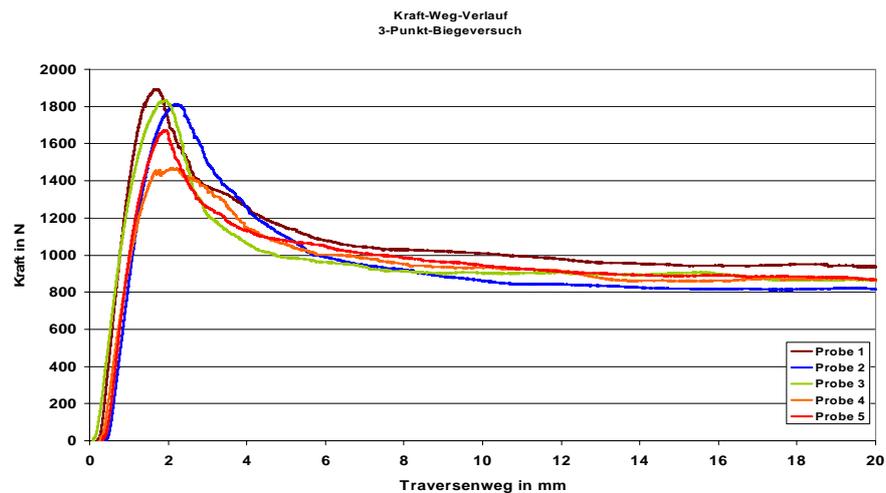


Abb. 16: Kraft-Weg Kurven der 3-PB für 25 mm Sandwich-Gesamtdicke

Im Vergleich zu den Verbunden mit nicht optimierten Herstellungsparametern bei geringeren Sandwichdicken findet die plastische Deformation hier entsprechend später statt (vgl. Abb. 9 und Abb. 12). Der elastische Bereich ist gut ausgeprägt und die Biegefestigkeitswerte liegen im erwarteten Bereich für diese Verbunde. Damit ist nachgewiesen, dass durch die optimierte Auswahl der Aufschäumparameter eine gewisse Sandwichdickenvariation möglich ist.

Scherversuche an Aluschaum-Sandwich-Verbunden

Bei der Durchführung der Finite-Elemente Berechnung zur Auslegung des Frontmoduls hat sich gezeigt, dass eine experimentelle Ermittlung des Schermoduls, G , des Aluminiumschaum-Kernmaterials zur Absicherung des Materialmodells erforderlich ist. In Anlehnung an die Norm DIN 53294, /3/, wurde der Schermodul mittels der in Abb. 17 dargestellten Anordnung bestimmt.

Es wurden Prüfkörper mit dem Abmaßen 200 mm x 50 mm x 40 mm aus aufgeschäumten Plattenmaterial herausgearbeitet auf deren Deckbleche Stahllaschen (St 37, Stärke 5mm) mittels Scotch Weld 7240 A/B FR befestigt wurden. Die erforderliche Scherbelastung wurde dann über die Stahllaschen in die Sandwichstruktur eingeleitet. In Abweichung zur Prüfnorm /3/, die eine Erfassung der Verschiebung der Deckbleche zueinander über ein Längenmessgerät vorsieht, kam auch hier die bereits beschriebene Grauwertkorrelationsmethode zum Einsatz. Abb. 17 zeigt den hierfür notwendigen Aufbau der lediglich aus einer Kamera besteht deren Aufnahmezeitpunkte mit dem Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfmaschine korrelierbar sind.



Abb. 17: Scherversuch, Erfassung der Deformation mittels Kamera und Anwendung der digitalen Bildkorrelation

Alle untersuchten 5 Proben zeigten ein Versagen im Schaum diagonal zum Sandwich Abb. 18. Es bestand gute Haftung zwischen Schaum und Sandwich. Es trat kein Versagen der Klebstelle auf.

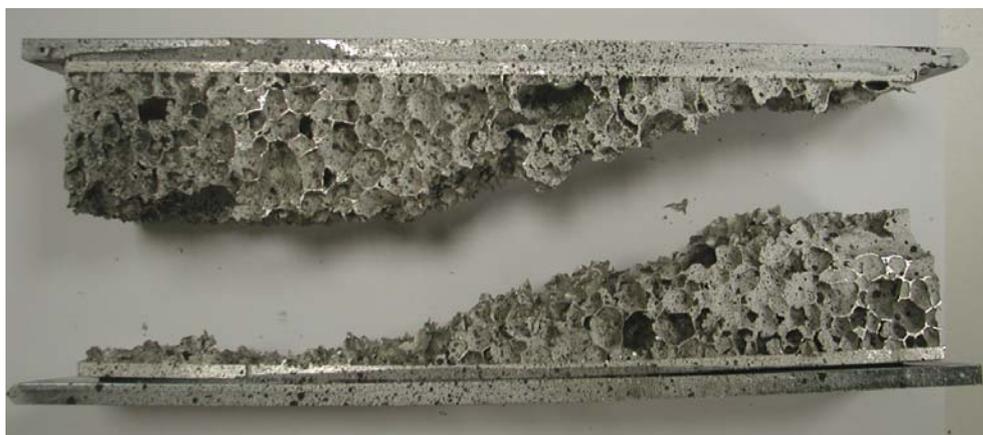


Abb. 18: Scherbruch im Aluminiumschaum-Kern

Die Versuche zur Bestimmung des Schubmoduls wurden derart durchgeführt dass 4 mal hintereinander eine Belastung von 100 N (Vorkraft) bis 10kN angefahren wurde und im 5ten Lauf der Versuch bis zum Scherbruch des Probekörpers geführt wurde. Es zeigte sich eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Kraftverläufe im elastischen Bereich, Abb. 19.



Abb. 19: Kraft über Zeit Diagramm einer ausgewählten Probe,

Zur Bewertung der Messergebnisse hinsichtlich des Schubmoduls des Kernmaterials wird das Kraft-Schubverformungsdiagramm ausgewertet, wobei zu beachten ist, dass es bei der beschriebenen Versuchsdurchführung aufgrund der Anordnung der Kamera zum Versuchsaufbau zu Festkörperverschiebungen insbs. Rotation kommt, die bei der Auswertung der Verschiebungsdaten berücksichtigt werden müssen.

Zur Extraktion der Schubverformung der Decklagen zueinander werden die Verschiebungsvektoren entlang virtueller Geraden ausgewertet, die man in der uniDAC Software der CWM GmbH beliebig positionieren kann. In Abb. 20 ist die Vorgehensweise verdeutlicht. Aus den Verschiebungswerten, die sich aus der Verschiebung der grünen Linien zu den roten Linien ergeben, und der anschließenden Eliminierung der Festkörperverschiebung (Translation und Rotation) lässt sich eine mittlere Schubverformung berechnen. Damit ist die Schubverformung der Decklagen zueinander bestimmt und es kann unter Beachtung der geometrischen Abmaße und dem gemessenen Kraftunterschied entsprechend der DIN 53294, /3/ der Schubmodul G_K des Kerns berechnet werden. In Abb. 21 sind die aus den 4 Belastungskurven im elastischen Bereich ermittelten Werte dargestellt. Es ergibt sich daraus ein Mittelwert von $G_K = 505$ MPa.

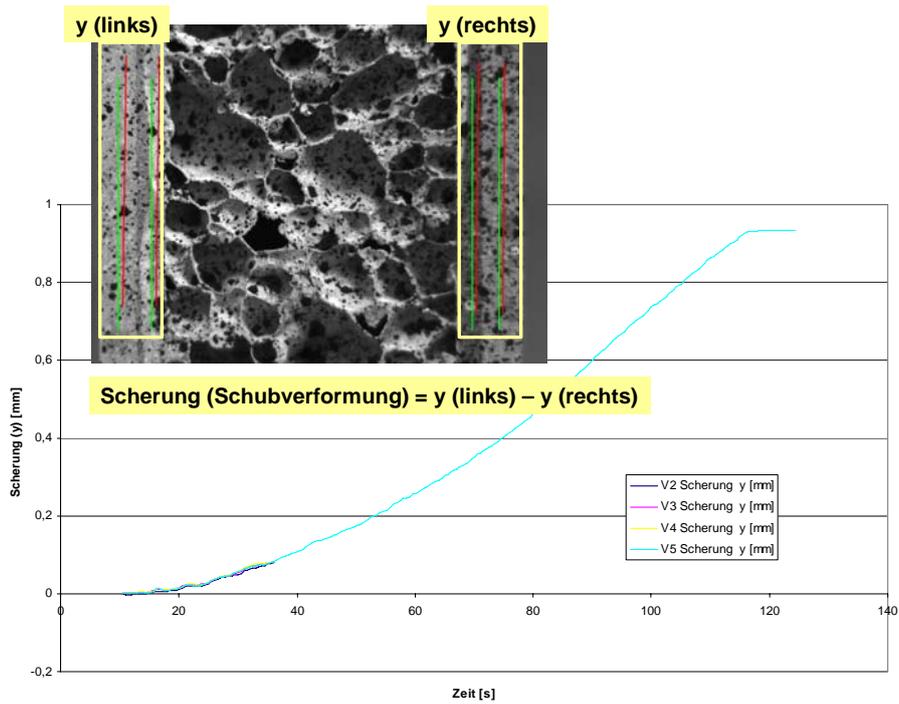


Abb. 20: Schubverformungs-Zeit Diagramm des Scherversuchs

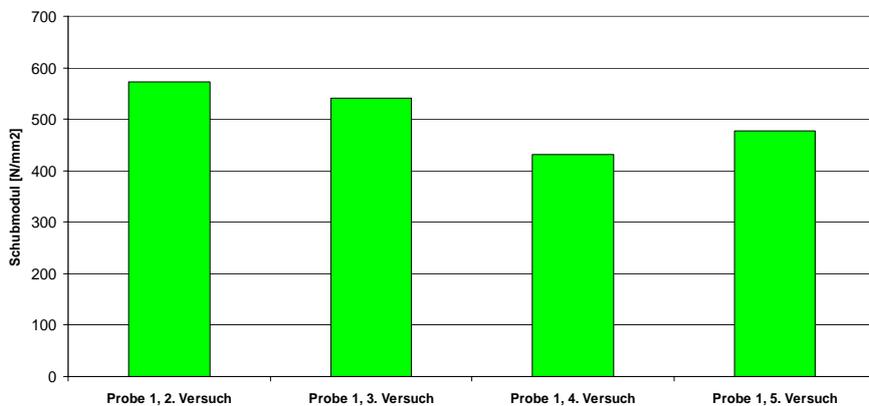


Abb. 21: Ermittelte Schubmodulwerte aus wiederholten Belastungstests

Die hier vorgestellte an die DIN 53294 /3/ angelehnte Methode zur Bestimmung von Schereigenschaften von Kernverbunden stellt eine alternative Möglichkeit dar. Es ist geplant diese Methode im AK "Zellulare Metalle" des DGM-Fachausschuss "Metallische Verbundwerkstoffe und zellulare Metalle" vorzustellen.

Zusammenfassung

Die mechanische Charakterisierung der Aluminiumschaum-Sandwich-Verbunde mittels Druck, 3-Punkt-, 4-Punkt und Scherprüfung, zeigt dass die Technologie des Aufschäumens, der im Projekt verfügbaren Materialien, bei Beherrschung der Prozessparameter während des Aufschäumens, zu hervorragenden Schaumqualitäten führt. Bei der Herstellung von Fahrzeugkomponenten ist unbedingt darauf zu achten dass ein im Bezug auf den Aufschäumgrad geeignetes Ausgangsmaterial verwendet wird, das die Realisierung eines

möglichst homogenen Schaums sicherstellt. Von der Begrenzung des Aufschäumwegs zur Realisierung von verschiedenen Verbunddicken mit dem gleichen Ausgangsmaterial wird abgeraten. Da sich gezeigt hat, dass Inhomogenitäten im Schaum oder in der Verbindung vom Schaum zu den Decklagen Initialstellen des Verbundversagens darstellen, wird eine diesbezügliche Qualitätskontrolle im Produktionsprozess eines Aluschaum-Fahrzeugmoduls zumindest in der Realisierungsphase einer Serienproduktion empfohlen.

Die im vorangegangenen Abschnitt diskutierten aus den Prüfungen gewonnenen Werte wurden im Projektverlauf in mehreren Schritten zur Generierung eines FE-tauglichen Werkstoffmodells herangezogen. Die Vorgehensweise wird im Folgenden näher erläutert.

II.1.1.2 Ableitung eines numerischen Materialmodells für die FE-Simulation

In einem ersten Schritt wurde ein Druckversuch aus der Charge der in Abb. 3 dargestellten Messugen simulatorisch erfasst. Das Simulationsmodell bildete geometrisch einen mittleren Probenkörper ab und simuliert die feste Unterlage und die vorgegebene Traversenbewegung lt. Messung. Auf Grund der zu erwartenden Verformungen wurde geometrische Nichtlinearität bezüglich Dehnungen/Verformungen und Rotationen unterstellt. Als Materialmodelle für den Schaum wurden getestet:

1. „Porous metal plasticity“ nach Gurson, Tvergaard /5/: Das Modell beschreibt Void-Entstehung und Void-Wachstum infolge von überwiegend hydrostatischen Zugspannungen und führt den prozentualen Volumenanteil der Voids an einem Teilvolumen als Schädigungsparameter, dessen Wachstum einer Gleichung folgt, die diesbezüglich viskoses Materialverhalten beschreibt. Derart angesammelte Schäden führen zu makroskopischem Steifigkeitsverlust, dadurch zu größeren Dehnungen/Verzerrungen und höheren Spannungen im verbleibenden tragenden Material. Das Schädigungsmaß wird oft auch als Kriterium für das Versagen eines Volumenanteils benutzt.
2. „Crushable foam plasticity/viscosity“ wie standardmäßig von ABAQUS™ bereitgestellt /4/: Das Modell beschreibt die Neigung von Schäumen zum Knicken von Zellwänden unter Kompression. Es wird zudem angenommen daß die resultierenden Deformationen sofort eintreten und irreversibel sind. Volumetrische Verfestigung und Dehnungsgeschwindigkeitsabhängigkeit können ebenfalls einbezogen werden.

Sowohl angesichts des physikalischen Verhaltens von AL-Schäumen, als auch wegen der zu erwartenden spezifischen Belastungen im Sandwich-Verbund wurde das letztere Modell vorgezogen, Dehnungsgeschwindigkeitsabhängigkeiten wurden vorerst nicht einbezogen. Aus den Experimenten ergab sich dafür ebenfalls keine Notwendigkeit.

Mit Hilfe des FEM-Codes ABAQUS™ wurde eine Simulation der durchgeführten Experimente vorgenommen. Das heißt, sowohl die Geometriedaten als auch die Randbedingungen und äußere Belastungen (Zeitverläufe aus der Messung) wurden den Experimentdaten angepasst. Ziel war, die Verformung eines mittleren Probekörpers bei vorgegebener Traversenbewegung zu simulieren und durch Anpassung der Parameter des Stoffgesetzes für den AL-Schaum, die resultierenden Kräfte und die im Inneren des AL-Schaumkerns zu beobachtenden Verformungen zu erreichen, Abb. 22. Andere mögliche Vorgehensweisen – z.B. mittels meso-mechanischer Ansätze aus dem mechanischen Verhalten eines repräsentativen Porenvolumens über Homogenisierungstechniken das globale mechanische Verhalten des Schaums zu beschreiben – waren nicht Gegenstand der Arbeiten. Sie finden sich in der Literatur /7/-/14/ und /16/-/18/. Diese Ergebnisse werden hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit innerhalb des Projekts geprüft. Grundlage für erste Eingangsdaten bildeten die Arbeiten zu FOMINAL /15/.

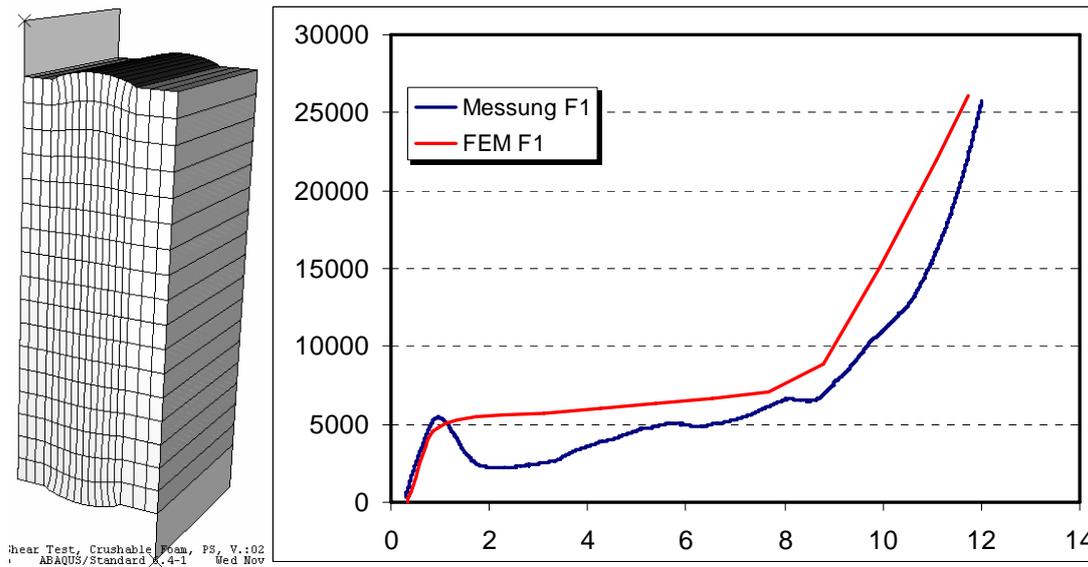


Abb. 22: Simulierte Verformung des Probekörpers und Kraft-Verformungskurven aus Messung und Simulation nach Anpassung der Materialdaten

II.1.1.3 Abschätzung notwendiger Schichtdicken

Für die Abschätzung notwendiger Schichtdicken bei Einsatz von AL-Schaum am Itino wurde die vorhandene Laminate-Formulierung des vorderen Fensterholms als Vorbild genommen und Abschätzungen unter Annahme verschiedener Belastungen vorgenommen.

Zugbelastung (Abb. 23):

- Laminat aus dem Bereich des Holms bei einer Zugkraft A,
- AL-Schaum-Komposit mit Deckschichtdicke 1mm bei einer Zugkraft B,
- Anpassung der Zugkraft B an A durch Variation der Dicke der Deckschichten bei gleichbleibender Verlängerung

Ergibt eine Dicke der Deckschichten von $D = 0,282$ mm bei Schaumdicke 50 mm.

Unter dem Aspekt craschere Frontmodule ist insbesondere die Schaumdicke bei Biegebelastung und zur Energieabsorption von Interesse.

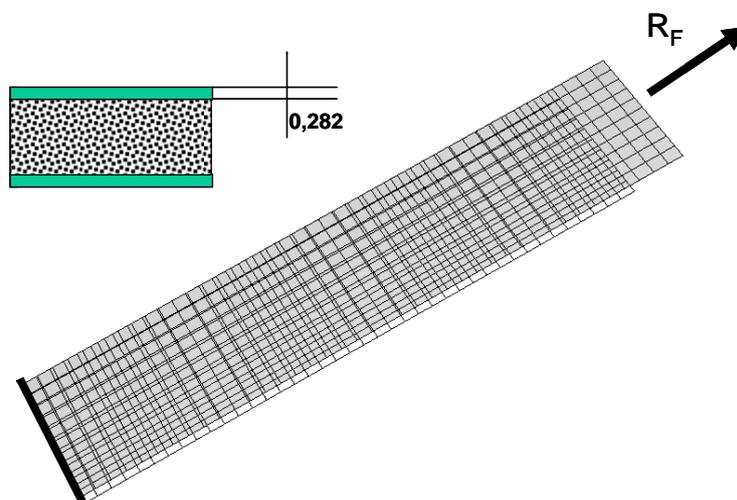


Abb. 23: Simulation des Zugversuches zur Abschätzung der notwendigen Deckschichtdicke

Biegebelastung (Abb. 24) bei Deckschichtdicke 1 mm :

- Laminat aus dem Bereich des Holms mit Biegekraft A
- AL-Schaum-Komposit mit Schaumkerndicke 50 mm mit Biegekraft B
- Anpassung der Biegekraft B an A durch Variation der Schaumkerndicke bei gleichbleibender Durchbiegung

Ergibt eine Schaumkerndicke $D = 27,61$ mm bei Deckschichtdicke 1 mm

Biegebelastung (Abb. 24) bei Deckschichtdicke 3 mm :

- Laminat aus dem Bereich des Holms mit Biegekraft A
- AL-Schaum-Komposit mit Schaumkerndicke 50 mm mit Biegekraft B
- Anpassung der Biegekraft B an A durch Variation der Schaumkerndicke bei gleichbleibender Durchbiegung

Ergibt eine Schaumkerndicke $D = 17,24$ mm bei Deckschichtdicke 3 mm

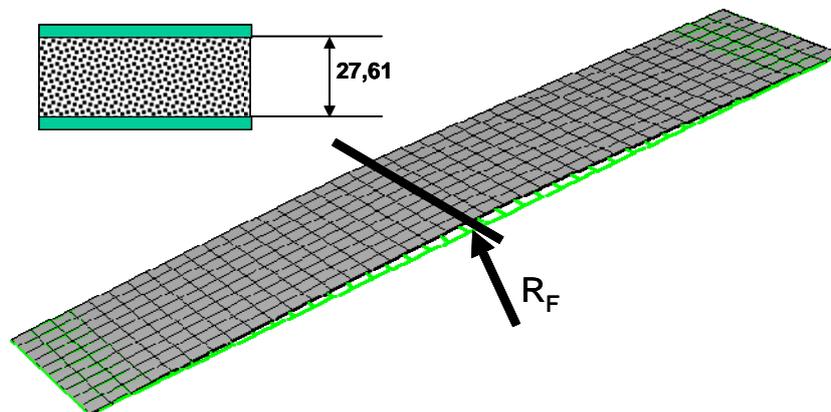


Abb. 24: Simulation des Biegeversuches zur Abschätzung erforderlichen Deckschichtdicke

Zusammenfassend lässt sich festhalten dass die Abschätzung der notwendigen Deckschichtdicke bei gleichbleibender Zugelastizität – Vorbild ist der vordere Fensterholm des Itino - eine Blechdicke von $D = 0,282$ mm bei Schaumdicke 50 mm ergibt. Die Abschätzung der notwendigen Schaumkerndicke bei gleichbleibender Biegeelastizität – Vorbild ist wiederum der vordere Fensterholm des Itino - ergibt eine Dicke von $D = 27,61$ mm bei Deckschichtdicke 1mm und von $D = 17,24$ mm bei Deckschichtdicke 3 mm. Im Ergebnis der FE-Analysen wurden vom Konsortium für die konstruktive Auslegung und erste technologische Arbeiten eine beidseitige Deckblechdicke von 3 mm und eine Dicke des Aluminiumschaumkerns von rund 20 mm vereinbart. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden aus konstruktiven und werkstoffmechanischen Gründen Gesamtverbunddicken von 30 mm und 20 mm realisiert.

II.1.1.4 Optimierungsmethoden durch probabilistische Materialparametervariation der FE-Modelle

Über die zur Verwendung in FEM-Berechnungen erforderlichen Materialdaten lagen zunächst nur unsichere Erkenntnisse vor. Dies liegt sicher einerseits an der technologisch bedingten Streuung der Porendichte und –struktur, andererseits aber auch an der Verwendung unterschiedlichster Messanordnungen und den damit verbundenen spezifischen Belastungssituationen.

Während die Querkontraktionszahl für Schäume bekannterweise sehr klein ist, solange die Poren nicht fast vollständig zusammengedrückt sind, bieten die üblichen Druckversuche

kaum Anhaltspunkte für den Elastizitätsmodul oder andere Materialparameter zur Beschreibung des plastischen viskoplastischen Materialverhaltens.

Als geeignet für die Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Al-Schäumen hat sich das „Crushable foam plasticity“-Modell von Deshpande und Fleck /13/ erwiesen, das auch zum viskoplastischen Modell erweiterbar und damit für Impact-Beschreibungen verwendet werden kann. Hier wurde volumetrische Verfestigung unterstellt, so daß zur Materialbeschreibung im Wesentlichen

- der Elastizitätsmodul (Young's modulus foam),
- die Poisson-Konstante (Poisson's ratio foam) und
- das Fließspannungs-Verhältnis für Kompression (Tension ratio foam)

weitgehend unbestimmt sind.

Die Übertragbarkeit des Druckversuchs auf Biegeversuche ist nicht möglich deshalb haben sich die Parameter als wichtigste Größen zur Angleichung der Ergebnisse ergeben.

Zur näherungsweisen Ermittlung dieser Parameter wurde das DOE- und Optimierungsprogramm OPTIMUS™ von NOESIS herangezogen.

Die Approximation sollte einen Abgleich zwischen Ergebnissen der experimentellen 3-Punkt-Biegeversuche und den mittels Simulation identischer Versuche ermittelten Ergebnisse bringen. Dazu wird ein parametrisiertes FE-Modell erstellt, dessen Parameter in diesem Fall „nur“ die o.g. Materialparameter sind. Als zu minimierende Zielfunktion wird die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen Messung und Berechnung an definierten Punkten ermittelt. Das waren hier definierte Punkte auf der Kraft-Verformungs-Kurve des Biegeversuchs. Für eine Approximation im Sinne einer Minimum-Suche können dann in einem Tool wie OPTIMUS die Parameter und deren zulässige Variationsbereiche und die zu verwendenden Algorithmen und Modelle definiert und die Optimierungsrechnungen ausgeführt werden - Abb. 25. Zwischenergebnisse können Modelle sein, die auf DOE (Design Of Experiment) und so genannten RSM (Response Surface Method) beruhen, die einen Überblick über funktionelle Zusammenhänge liefern – siehe Abb. 26.

Bei der Optimierung werden von diesem Tool die definierten Parameter im erlaubten Parameterfenster variiert mit dem Ziel, die Zielfunktion zu minimieren. Idealerweise wäre deren Wert Null. Am gefundenen Minimum der Zielfunktion existiert dann ein Satz von Parametern, der in diesem Fall zu einer Kraft-Verschiebungskurve führt, die nächstmöglich an der gemessenen Kurve liegt. Damit sind die Parameter optimal für den behandelten Belastungsfall. Eine parallele Durchführung solcher Untersuchungen kann dann mittels Mehrziel-Optimierung einen solchen Parametersatz liefern, der zu allen diesen Belastungsfällen passt.

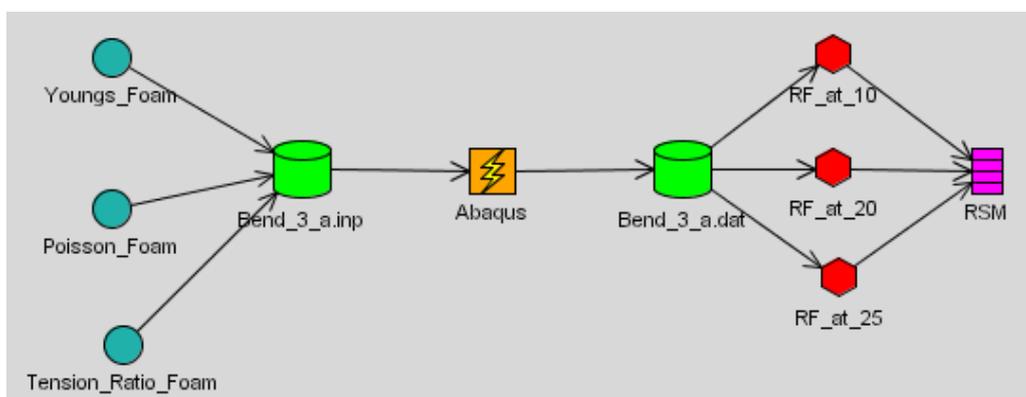


Abb. 25: Vereinfachtes DOE-Schema für die Anpassung auf 3 Messpunkte der Kraft-Verformungskurve

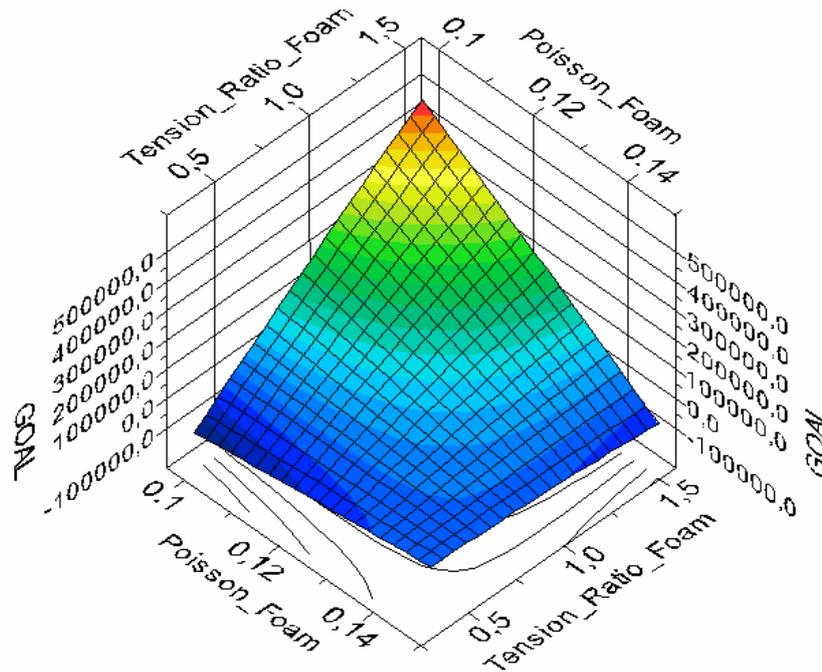


Abb. 26: Abhängigkeit der gebildeten Zielfunktion von Poisson-Konstante und Fließspannungs-Verhältnis für Kompression des Al-Schaums

Zum Abgleich der experimentell ermittelten Materialparameter (3PB, 4PB, Druck) mit Materialmodellen der FE-Methode kam eine Optimierungssoftware zum Einsatz. Mittels OPTIMUS können probabilistische Materialparametervariationen derart durchgeführt werden, dass eine Optimierung und Approximation des Materialverhaltens auf Basis von FEM-Simulationen (ABAQUS) möglich ist. Für die numerische Abbildung der experimentellen 4PB-Versuche wurden folgende Annahmen und Zieldefinitionen getroffen:

Annahmen:

- Rollenreibung $\mu=0,2$
- Crushable Foam Model (Deshpande, Fleck 2000),
- Volumetrische Verfestigung, yield stress ratio for compression loading =1,5
- Variablen: E, n, k_t (yield stress ratio for hydrostatic loading)

Ziele

- Konvergenz der Lösung,
- Anpassung Kraft-Verschiebung-Kurve,
- Anpassung Versagensbild

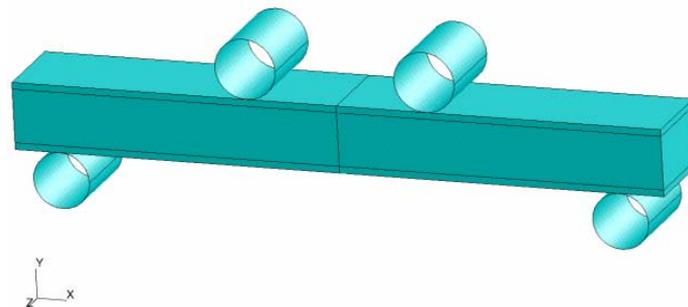


Abb. 27: Einsatz von OPTIMUS zur Approximation des Materialverhaltens auf Basis von FEM-Simulationen (ABAQUS) unter Berücksichtigung des Kontaktverhaltens der Andruckrollen

In Abb. 28 ist das Ergebnis der Parameteroptimierung dargestellt. Der 4PB Versuch kann demnach mit einem optimierten Materialparametersatz so simuliert werden, dass die Biegung inklusive der „plastischen“ Deformation bis zum ersten Bruchversagen abgebildet wird.

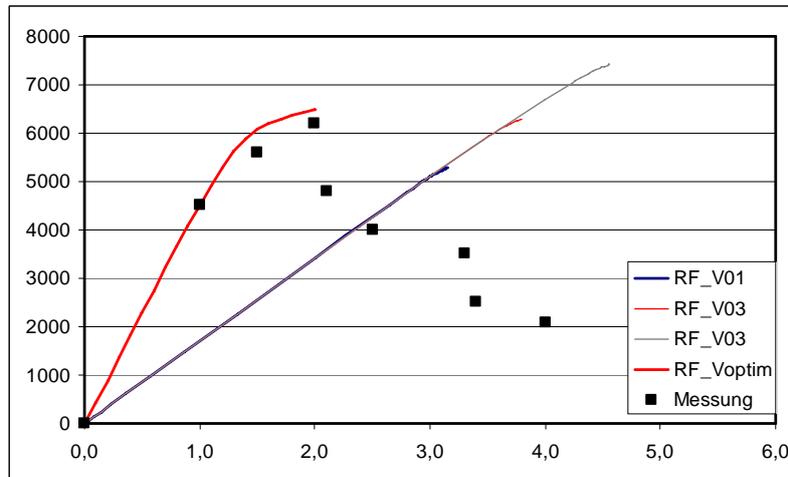


Abb. 28: Kraft-Verschiebung-Kurven Experimente vs. FEM-Simulation nach Parameterapproximation mittels OPTIMUS

Abb. 29 stellt das Materialversagen eines 4PB-Versuchs im Experiment und in der optimierten Simulation gegenüber. Eine Übereinstimmung im Versagensverhalten ist deutlich zu erkennen.

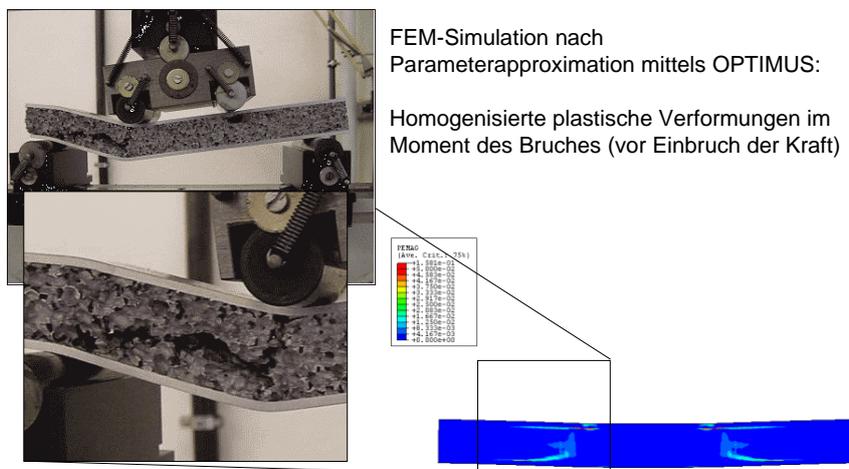


Abb. 29: FEM-Simulation nach Parameterapproximation mittels OPTIMUS

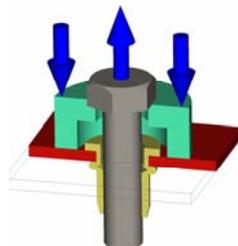
II.1.2. Prüfung von Verbindungselementen, Schweißbolzen, Einnietbolzen, Einnietmuttern

Zur Untersuchung von möglichen Verbindungselementen zur Montage der Sandwichbauteile an die tragende Struktur des Schienenfahrzeuges und zur Befestigung von Anbauteilen wurden vom Konsortium verschiedene Verbindungselemente vorgeschlagen. Durch die BTU Cottbus wurden ein- und aufgeklebte Verbindungselemente hergestellt während, Wilhelm-Schmidt eingenetete und geschweißte Elemente realisierte. In Abb. 30 und Abb. 35 sind die untersuchten Verbindungselemente zusammengestellt. Abb. 31 zeigt die von BT geforderten Prüfungen entsprechend den Vorschlägen eines Herstellers (BÖLLHOFF). Hierzu wurde von BTU eine geeignete Probenhalterung entsprechend den Vorgaben von AMIC hergestellt. In Abb. 32- Abb. 36 sind ausgewählte Kraft/Traversenweg Diagramme dargestellt.

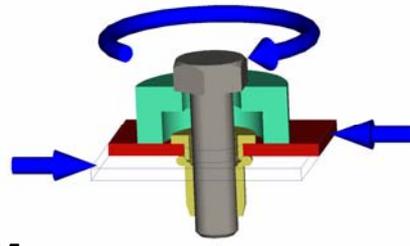


Verbindungstyp	Nummer
Nietmutter geklebt	1.1 bis 1.5
Einnietmutter Senkkopf	26 bis 30
Einnietmutter Aluminiumring	20 bis 24
Einnietmutter verzinkt	14 bis 18
Einnietbolzen	8 bis 12
Schweißbolzen	1, 5 und 6

Abb. 30: Übersicht Verbindungselemente



F_D : Zugkraft mit Abstützung auf dem Bauteil



M_D : Drehmoment mit Abstützung auf dem Bauteil

Abb. 31: Prüfkraft und Moment an einem RIVKLE®, Bildquelle: BÖLLHOFF

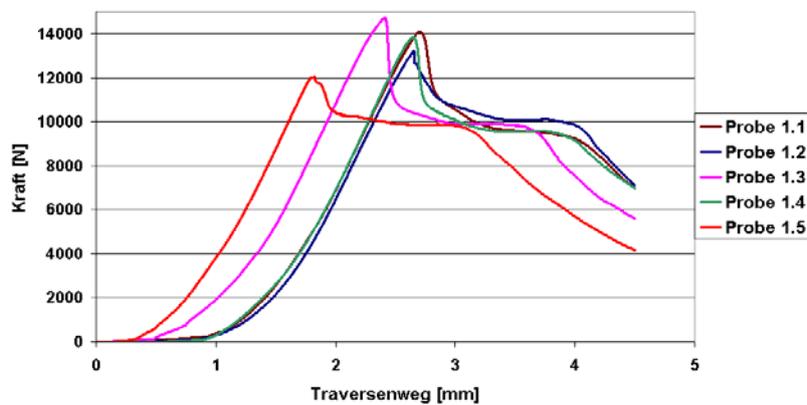


Abb. 32: Auszugs-Prüfung der Nietmutter geklebt, Nietmutter um etwa 1 mm herausgezogen

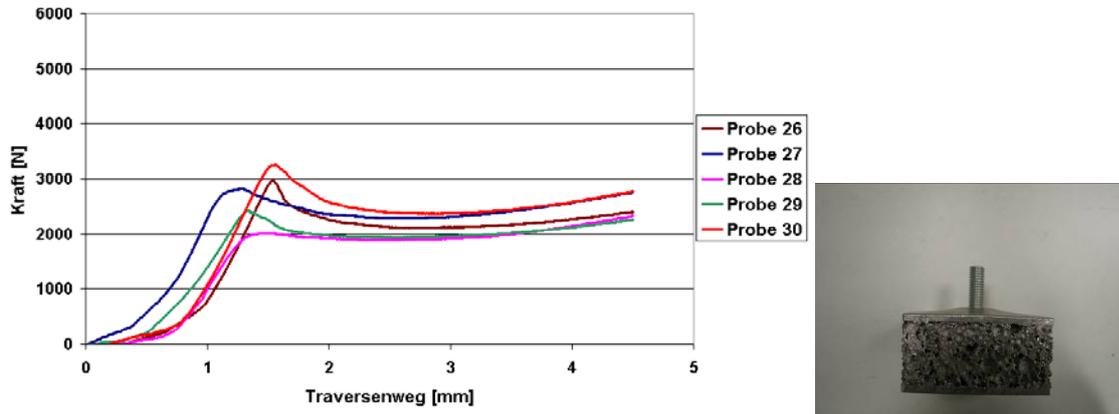


Abb. 33: Auszugsprüfung mit Einnietmutter Senkkopf, Wölbung des Deckblechs

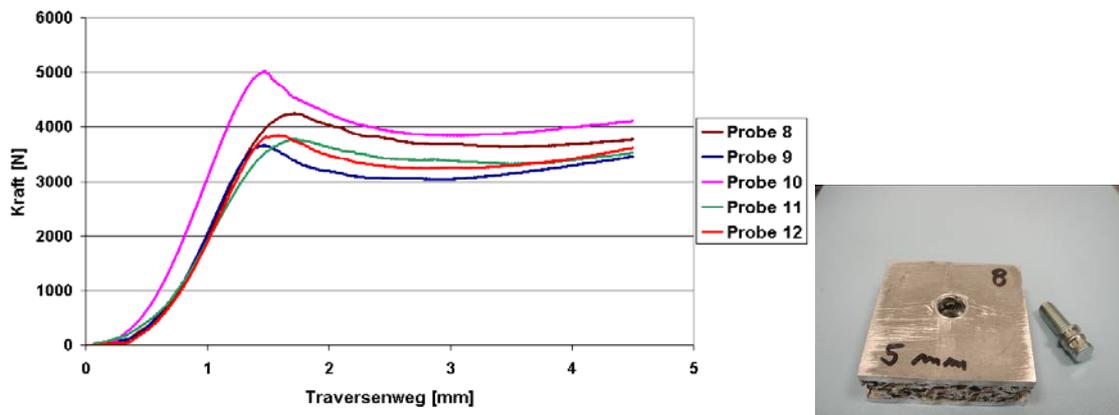


Abb. 34: Auszugstest an Einietbolzen, Wölbung des Deckblechs

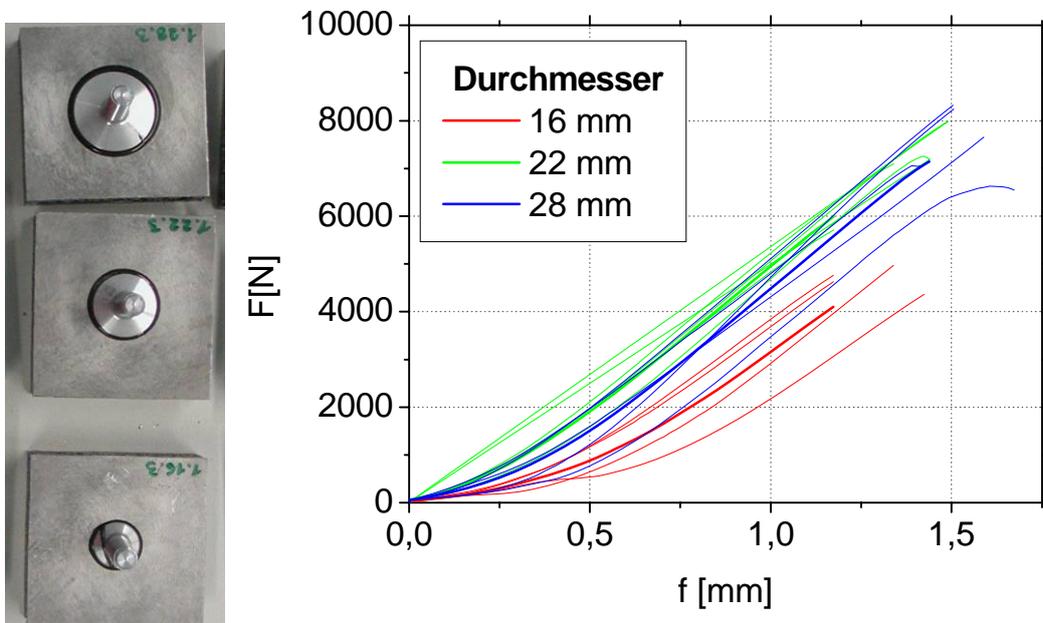


Abb. 35: Auszugstest aufgeklebte Gewindebolzen mit verschiedenen Durchmessern

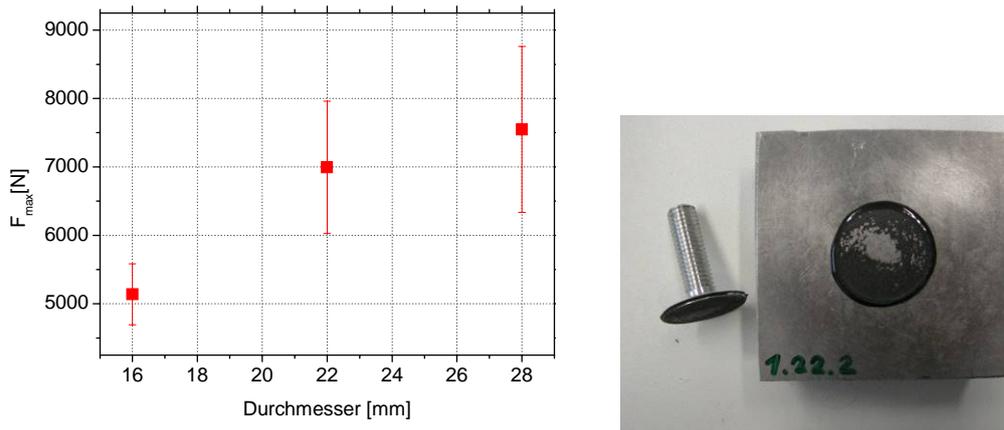


Abb. 36: Ergebnisse aufgeklebte Gewindebolzen mit verschiedenen Durchmessern

In Abb. 37 sind die Ergebnisse von Torsionsversuchen an geklebten Bolzen dargestellt

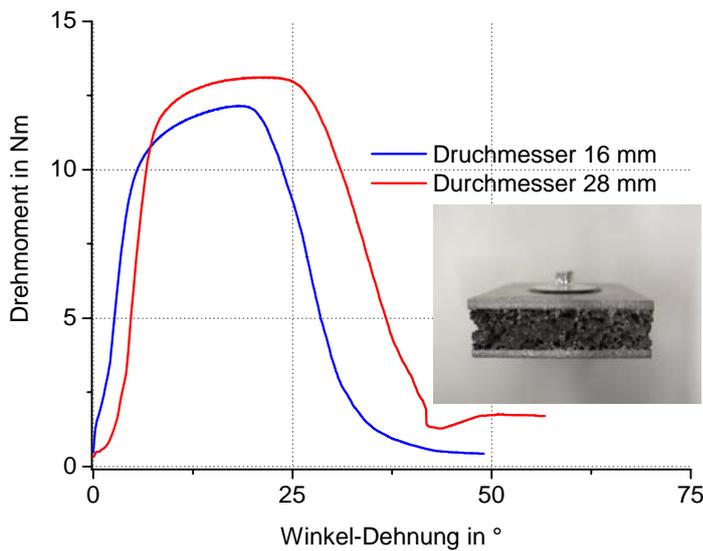


Abb. 37: Torsionsversuch an aufgeklebtem Gewindebolzen, Versagen des Bolzens

Zusammenfassend ergeben sich folgende Ergebnisse:

Bei den Nietmuttern und Einnietschrauben erreichen die eingeklebten Gewindestücke die höchste Werte: 13,5 kN gefolgt von

Einnietmutter verzinkt	4,17 kN,
Nietschrauben	4,11 kN,
Nietmuttern Aluring	2,94 kN,
Einnietmutter Senkkopf	2,76 kN

Die aufgeklebten Gewindebolzen erreichen höhere Maximallastwerte

Durchmesser 28 mm	7,5 kN
Durchmesser 22 mm	7 kN
Durchmesser 16 mm	5,2 kN

Die Kraftverteilung durch die großen Flächen der Klebestellen wirken sich positiv auf die Stabilität gegen Ausbeulen der Deckbleche aus.

Bei den Torsionsversuchen (reine Torsion) kam es bei den aufgeklebten und den geschweißten Gewindebolzen zum Bruch der Bolzen bei üblichen Werten des maximalen Anzugsmoments von 12,5 Nm für Aluminiumschrauben mit einem \varnothing von 8mm.

II.1.3. Prüfung von diversen Schweißverbindungen

II.1.3.1 Biegeversuche an Al-Schaum-Sandw. Stumpfnah-Schweißverbindungen

Die Montage- und Reparaturmöglichkeit einzelner Aluminiumschaum-Sandwich Segmente mittels allgemein verfügbarer Schweißverfahren ist eine wichtige Voraussetzung zur erfolgreichen Einführung der Aluminiumschaum-Sandwich-Verbunde. Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften einer Decklagenverschweißung wurden 4-Punkt-Biegeversuche an ungeschweißten, WIG- und MIG-geschweißten Sandwich-Verbunden durchgeführt. Abb. 38 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau mit einer ungeschweißten Probe, die sich durch das Auftreten von Scher-versagen im Schaummaterial auszeichnet.



Abb. 38: Prinzip 4-Punkt-Biegeversuch mit Schaum-Versagen infolge Scherkraftanteil

In Abb. 39 sind die unterschiedlichen Versagensformen der Sandwich-Verbunde dargestellt. Es tritt entweder ein Scherversagen des Schaums oder ein Bruch der unteren Schweißnaht auf.



Abb. 39: Versagen an ungeschweißten und geschweißten Sandwich-Verbunden

In Abb. 40 - Abb. 42 sind die durchgeführten Prüfungen zusammengestellt.

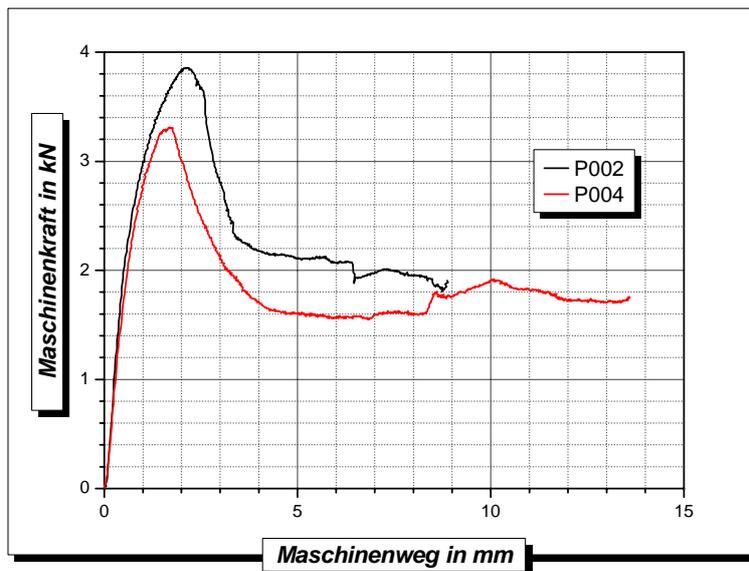


Abb. 40: Kraft-Durchbiegungskurven für 3PB-Versuche an ungeschweißten Proben

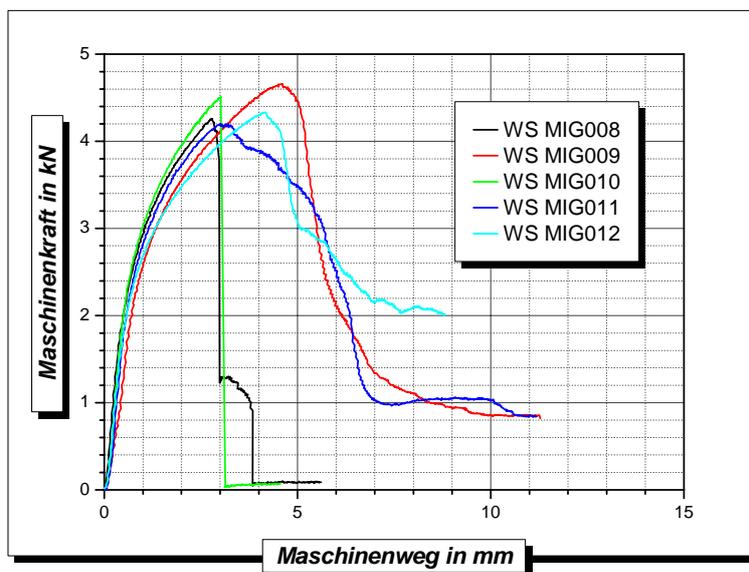


Abb. 41: Kraft-Durchbiegungskurven für 3PB-Versuche an MIG-geschweißten Proben

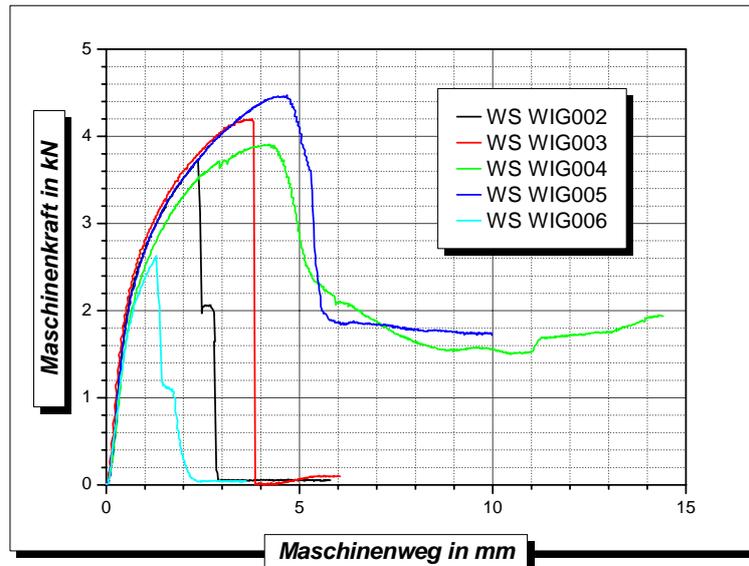


Abb. 42: Kraft-Durchbiegungskurven für 3PB-Versuche an WIG-geschweißten Proben

Schlussfolgerungen:

- Es treten bei den untersuchten geschweißten Proben die Versagensfälle Versagen in der Schweißnaht und Versagen im Schaum auf. Das Versagen der Schweißnaht hängt mit schlecht ausgeführten Schweißnähten zusammen.
- Ähnliche Kraft(Moment)-Durchbiegungsverläufe zwischen ungeschweißten und geschweißten Proben sind zu beobachten.
- Die MIG-geschweißten Proben erreichen eine höhere Maximallast bei größerem Maschinenweg. Die Ergebnisse streuen weniger im Vergleich zum WIG.

Die Versuche bestätigen die Möglichkeit mit gut ausgeführten Schweißnähten eine Fügetechnik von Aluminiumschaum-Sandwich-Verbunden im Schienenfahrzeugbau zu realisieren.

II.1.3.2 Belastung von T-Stoß geschweißtem Aluschaumsandwich

Die Realisierungsmöglichkeiten der Verbindungstechnologie durch Stumpfnähte legt die Verwendung von Al-Sandwich auch als Trägerstruktur nahe, was eine Erweiterung des Potentials des Al-Sandwich bedeutet. Zur Überprüfung dieser Möglichkeiten wurden Sandwich-auf-Sandwich T-Stoß Schweißverbindungen hergestellt, die bzgl. ihrer Biegesteifigkeit und -festigkeit im statischen Versuch geprüft wurden. Abb. 43 zeigt die T-Stoß Verbindung in einer speziell angeordneten Einspann- und Belastungsvorrichtung, die die Deformation des Steges gegenüber dem Gurt bis zum Versagen der Struktur ermöglicht.

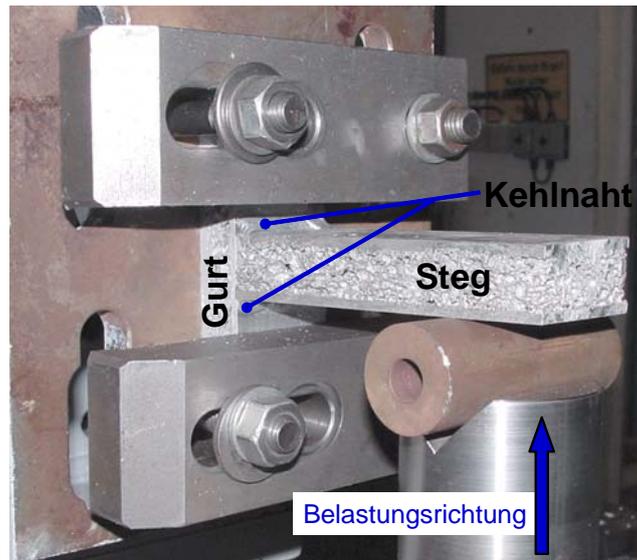


Abb. 43: Prüfung der T-Stoß Schweißverbindung mit Sandwich-auf-Sandwich Kehlnaht

In Abb. 44 sind die Ergebnisse der Prüfung dargestellt. Die aufgetragenen Maximalkräfte bewegen sich von 1,2 bis 1,8 kN. Zur besseren Vergleichbarkeit sind hier die auf die Schweißnähte aufgetragenen Biegemomente in Abhängigkeit vom Verformungsweg dargestellt. Der Vergleich der Belastungskurven macht deutlich, dass hier verschiedene Versagensmechanismen vorliegen müssen.

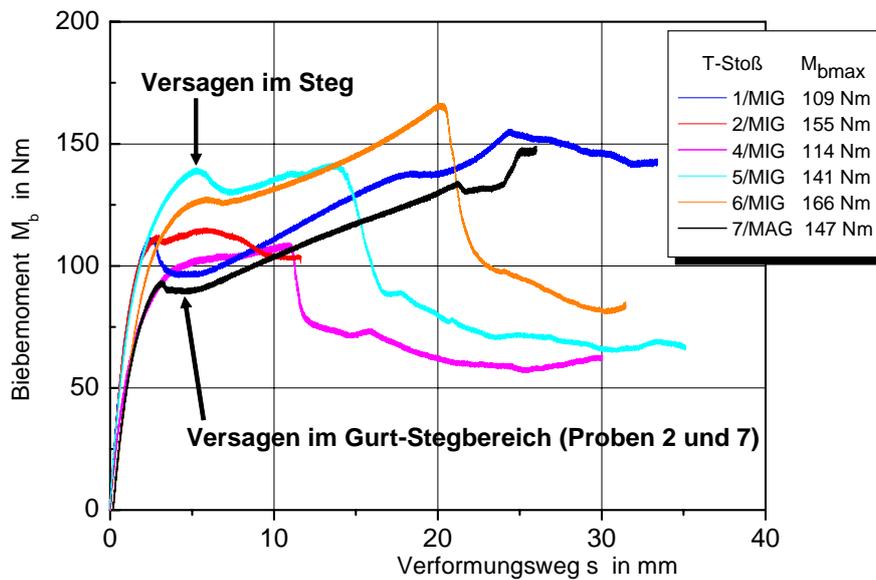


Abb. 44: Biegemoment in Abhängigkeit des Verformungsweges



Abb. 45: (links) Versagen durch Schubbelastung, (rechts) Versagen durch Abheben der Deckplatte im Gurt

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Versuch für Probe 4/MIG bei ca. 12 mm Verformungsweg infolge ungünstiger Einspannung abgebrochen, es erfolgte eine Korrektur der Einspannung
- Kein Versagen der Schweißnähte, Schweißnähte bei diesem Lastfall und technologiegerechter Ausführung wahrscheinlich unkritisch
- Delamination des Schaums im allg. nahe der Deckbleche
- Selektion von zwei Versagenskriterien:
 - Schubverformung im Schaum des Stegs, verbunden mit ausgedehnter Delamination im Schaum (vermutlich infolge von Schubverformungen im Schaum). Steg wird deformiert (plastisch gebogen), Abb. 45 (links); lokale Verformung in Umgebung der Schweißnähte vorhanden, aber nicht dominierend
 - Deformation der geschweißten Decklage des Gurtblechs (Delamination im Schaum nahe der auf Zug belasteten Kehlnaht, Stauchen des Schaums im gegenüber-liegenden Druckgebiet, Verformung infolge Zug dabei ausgeprägter), Steg bleibt dabei weitestgehend unverformt Abb. 45
- Da vermutlich immer Schaum für das Versagen verantwortlich vergleichsweise große Streuung in den Kraft- bzw. Biegemomentverläufen
- T-Stoß-Schweißnähte sind nach dem bisherigen Erkenntnisstand nicht das kritische Konstruktionselement

II.1.4. Numerische Simulationen des Frontmoduls

II.1.4.1 Übernahme des FE-Modells aus NASTRAN™

Für die im Rahmen der Projektarbeit durchzuführenden FEM-Berechnungen wurde von Bombardier Hennigsdorf ein Berechnungsmodell in GFK-Bauweise zur Verfügung gestellt. Die Daten standen als CAD-File und als Inputfile für den kommerziellen FEM-Code NASTRAN™ zur Verfügung. Da die AMIC GmbH standardmäßig nicht über NASTRAN™ verfügt, sondern FEM-Simulationen mittels des kommerziellen FEM-Codes ABAQUS™ ausführt, bestand die erste Aufgabe in der Umsetzung der Daten für die Weiterverwendung in ABAQUS™ /4/

Umsetzungswege:

- Import mittels PATRAN™ und Export nach ABAQUS™ → fehlerbehaftetes Ergebnis, zu hoher Umsetzungsaufwand,
- Import mittels ABAQUS™ → Umsetzung einiger Elementtypen des NASTRAN™ -Decks, Fixierung der Bewegungsmöglichkeiten einiger Referenzknoten und Trennung der verschiedenen Lastfälle mußten per Hand erfolgen.

Abb. 46 und Abb. 47 zeigen das Gesamtmodell bzw. das FEM-Modell des Frontmoduls.

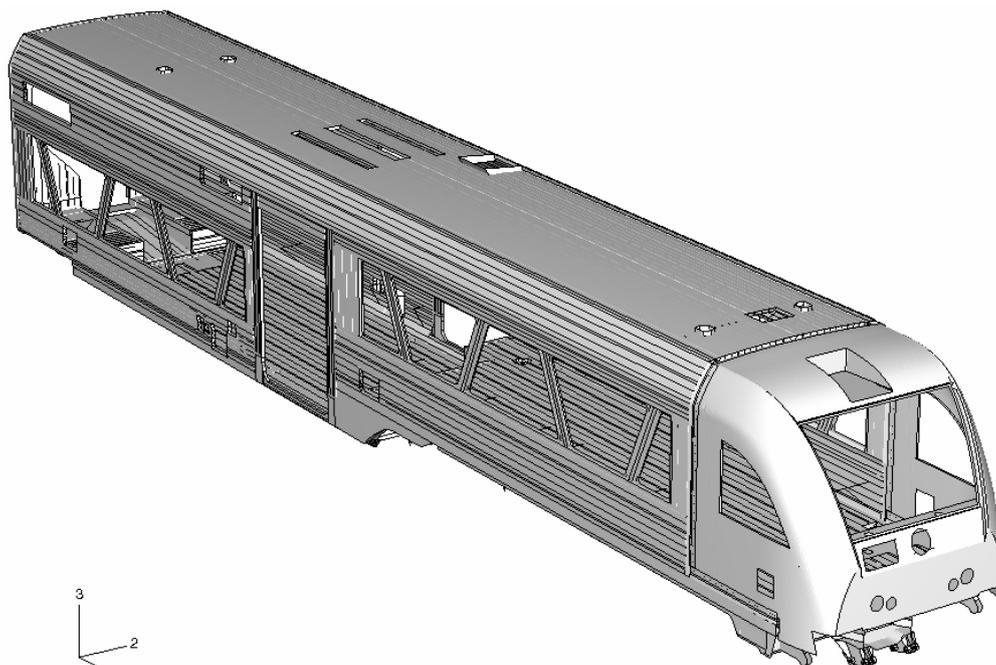


Abb. 46: Berechnungsmodell nach Übernahme der Quelldaten aus NASTRAN™

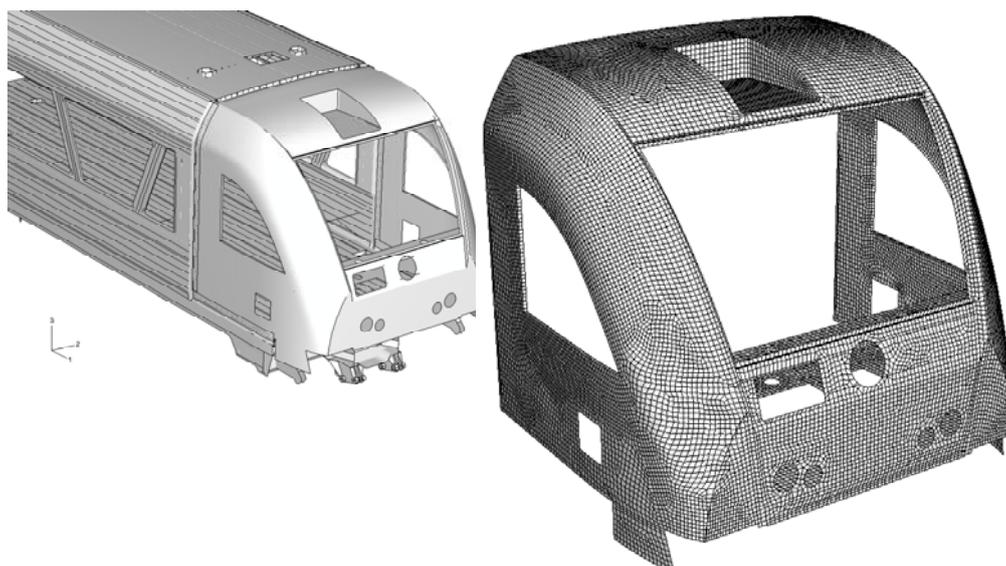


Abb. 47: Berechnungsmodell des Frontmoduls nach Übernahme der Quelldaten aus NASTRAN™

II.1.4.2 Simulation verschiedener relevanter Lastfälle

Die Berechnungen umfassten insgesamt 15 Lastfälle. Für die Belastungsbewertung wurden wegen der zu erwartenden hohen Belastungen zunächst die nachfolgenden vier relevanten Lastfälle von Bombardier ausgewählt, Abb. 48 - Abb. 51 und numerisch untersucht:

- Lastfall 1: 1500kN Druck auf Mittelpufferkupplung,
- Lastfall 3: 400kN Druck auf Kopf,
- Lastfall 4: 300kN Druck auf Fensterbrüstung,
- Lastfall 7: Stirnseitiges Anheben mit TDG vers.

Lastfall 1:
1500kN Druck auf
Mittelpufferkupplung

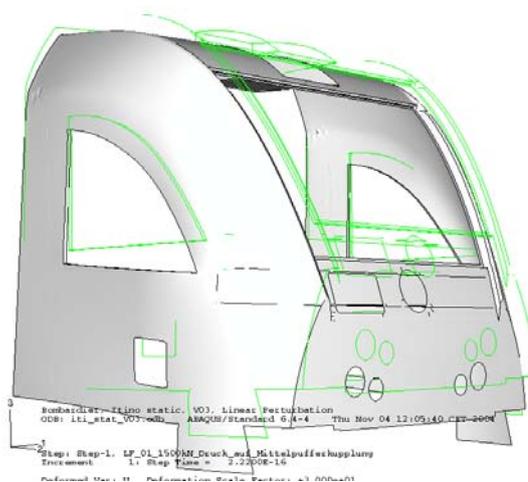


Abb. 48: Verformung des Frontmoduls im Lastfall 1: 1500kN Druck auf Mittelpufferkupplung

Lastfall 3:
400kN Druck Kopf

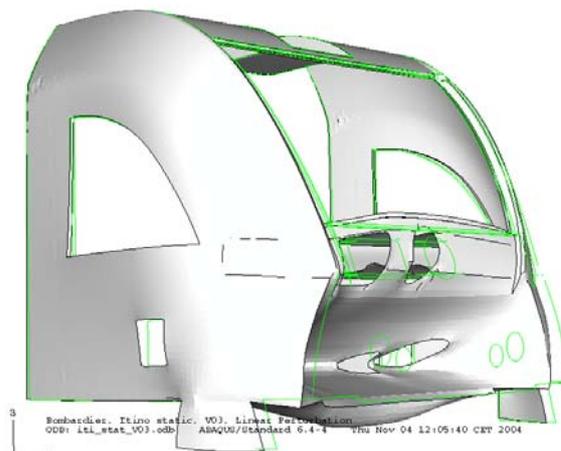


Abb. 49: Verformung des Frontmoduls im Lastfall 3: 400kN Druck auf Kopf

Lastfall 4:
300kN Druck auf
Fensterbrüstung

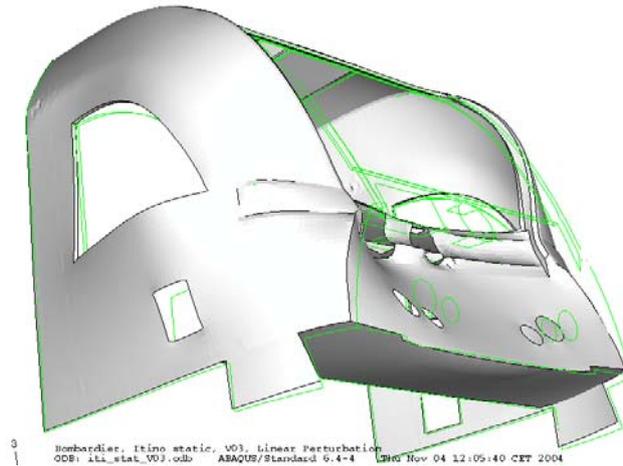


Abb. 50: Verformung des Frontmoduls im Lastfall 4: 300kN Druck auf Fensterbrüstung

Lastfall 7:
Stirns. Anheben mit
TDG vers.

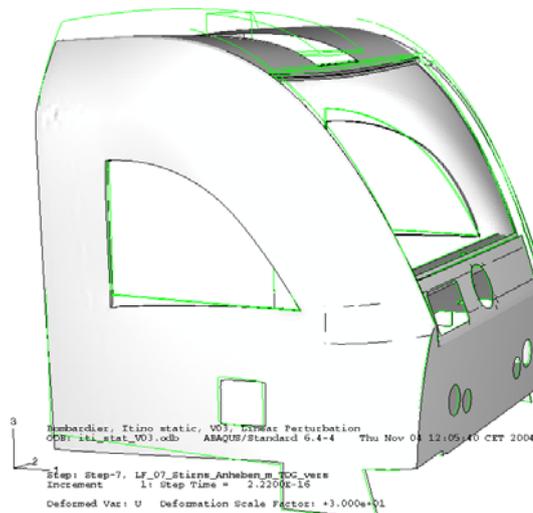
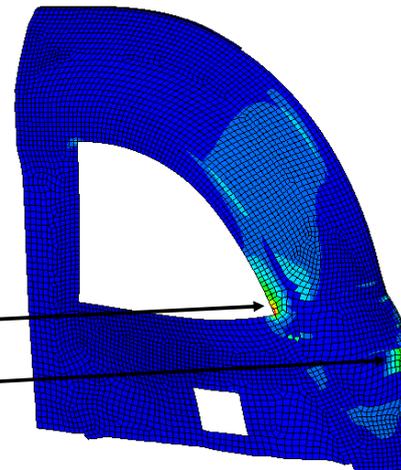
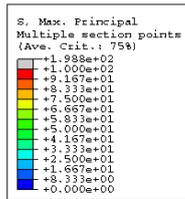


Abb. 51: Verformung des Frontmoduls im Lastfall 7: Stirnseitiges Anheben mit TDG vers.

II.1.4.3 Berechnungsergebnisse der verschiedenen Lastfälle

Die Berechnungsergebnisse wurden mittels klassischer Spannungs-Dehnungs-Bewertungsmethoden durchgeführt. Sie beinhalten weder die Bewertung singularer Spannungs-Dehnungsfelder noch Beuleneffekte etc. sondern sie konzentrieren sich auf den Seitenwand/Holm-Bereich (Abb. 52), den Bereich der vorderen Fensterbank-Versteifung (Abb. 53) und die Stirnwand (Abb. 54). Tab. 1 fasst einige der wichtigsten Ergebnisse zusammen.

Linke Seitenwand inkl. vorderer Fensterholm:



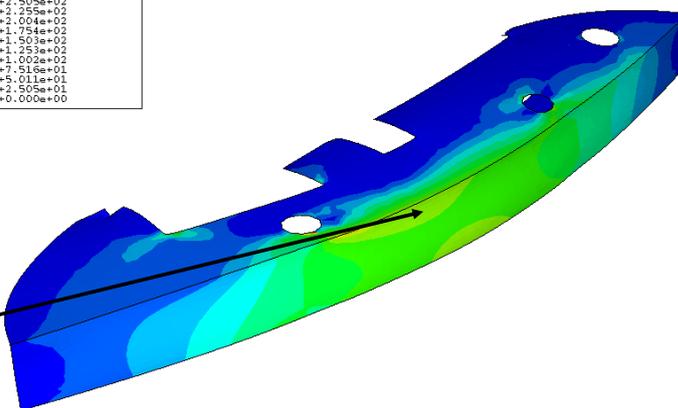
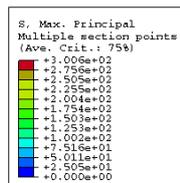
Max. Haupt-Spannungen im Lastfall 4:

Höchste Zugbelastungen an der vorderen Fensterkante und im Anschluß an die Stirnwand

Bombardier, Itino static, V03, Linear Perturbation
ODB: iti_stat_V03.odb ABAQUS/Standard 6.4-4 Thu Nov 04 12:05:40 CET 2004
Step: Step-4, LF_04_300kN_Druck_Fensterbruest
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Max. Principal
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+01

Abb. 52: Belastungen an der Seitenwand des Frontmoduls im Lastfall 4

Fensterbrüstung:



Max. Haupt-Spannungen im Lastfall 4:

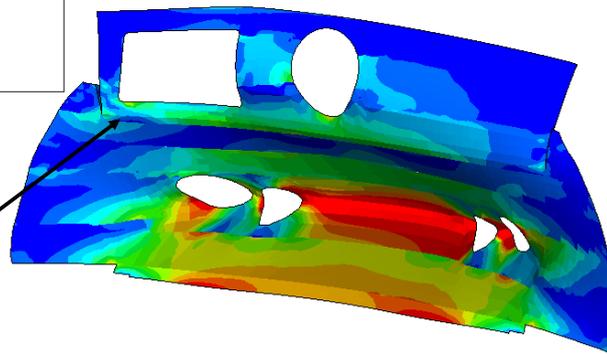
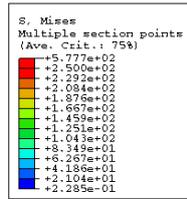
Höchste Zugbelastungen im „Zugtrumm“,

Starke globale Verwölbung

Bombardier, Itino static, V03, Linear Perturbation
ODB: iti_stat_V03.odb ABAQUS/Standard 6.4-4 Thu Nov 04 12:05:40 CET 2004
Step: Step-4, LF_04_300kN_Druck_Fensterbruest
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Max. Principal
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+01

Abb. 53: Belastungen der vorderen Fensterbrüstung im Lastfall 4

Stirnwand:



v. Mises-Spannungen im Lastfall 3:

Höchste Belastungen in der Umgebung des Lastangriffes,

Starke globale Verwölbung

Bombardier, Itino static, V03, Linear Perturbation
ODB: iti_stat_V03.odb ABAQUS/Standard 6.4-4 Thu Nov 04 12:05:40 CET 2004

Step: Step-3, LF_03_400kN_Druck_Kopf
Increment: 1; Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+01

Abb. 54: Belastungen der Stirnwand des Frontmoduls im Lastfall 3

Tab. 1: Bewertung der Lastfälle

Seitenwand:

Lastfall	v. Mises		max. Hauptspannung		min. Hauptspannung		max. Hauptdehnung [%]	
	max.	eff.	max.	eff.	max.	eff.	max.	eff.
1	63	30	49	30	-62	-20	0,27	0,2
3	149	45	96	45	-151	-70	0,62	0,31
4	199	70	199	80	-150	-40	0,65	0,27
7	79	53	81	50	-76	-30	0,3	0,1

Verstärkung der vorderen Fensterbank:

Lastfall	v. Mises		max. Hauptspannung		min. Hauptspannung		max. Hauptdehnung [%]	
	max.	eff.	max.	eff.	max.	eff.	max.	eff.
1	57	30	6	4	-6	-2	0,033	0,025
3	348	120	174	100	-347	-92	0,4	0,21
4	411	220	310	220	-412	-180	0,26	0,25
7	12	6	8	4	-12	-6	0,014	0,01

Stirnwand:

Lastfall	v. Mises		max. Hauptspannung		min. Hauptspannung		max. Hauptdehnung [%]	
	max.	eff.	max.	eff.	max.	eff.	max.	eff.
1	5	30	5	3	-6	-2	0,009	0,006
3	578	250	173	85	-539	-280	1,26	0,73
4	707	300	199	60	-710	-270	0,72	0,45
7	4	2	4	2	-3	-1	0,019	0,013

Anm.: Max.: Spitzenwerte (evtl. abhängig von der Netzdichte)

Eff.: Maximalwerte außerhalb von singulären Bereichen

Kritische Spannungen rot markiert

Ergebnisse:

1. Besonders die Lastfälle 3 und 4 zeigen hohe Spannungen in der Stirnwand und im Bereich der vorderen Fensterbankverstärkung.

2. Einige Spannungskonzentrationen zeigen singuläres Verhalten, müssen also gesondert behandelt werden.
3. In den Lastfällen 3 und 4 treten Spannungen auf, die Plastizierungen erwarten lassen – dies wurde bisher nicht berücksichtigt und ist auch nicht im NASTRAN™-Modell enthalten!
4. Sowohl die ermittelten Dehnungen als auch die Rotationen deuten teilweise darauf hin, daß die Annahme linear elastischen Verhaltens teilweise nicht gerechtfertigt ist.
5. Die verwendeten Elementtypen ergeben leider keine Aussagen über den auftretenden Schub über den Querschnitt (Ansatz "dünne Schale"). Es wird empfohlen, dies in zukünftigen Berechnungen zu berücksichtigen.

II.1.4.4 Zusammenfassung der Gesamtmodellanalysen

Übernahme des FEM-Modells aus dem von Bombardier Hennigsdorf bereitgestellten NASTRAN™ -Modell mittels ABAQUS™ konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Es wurden alle vorliegenden Lastfälle gerechnet. Ausgewertet wurden vereinbarungsgemäß die vier diskutierten Lastfälle – klassische Spannungs-Dehnungsauswertung. Die hier diskutierten Simulationen bildeten die Grundlage für die Bewertungen hinsichtlich vorzunehmender Materialsubstitutionen und die Dimensionierung des Aluminiumschaum-Sandwiches.

II.2. Nutzen / Verwertung

Das Projekt war darauf ausgelegt eine Hälfte eines Frontmoduls des Triebwagenzuges ITINO aus Aluminiumschaum-Sandwich zu konzeptionieren und herzustellen. Diese Ziele wurden erfüllt. Die dabei generierten Ergebnisse, insbesondere die erfolgreiche Umsetzung der Arbeiten in ein funktionsfähiges Demonstratorbauteil, erlauben es der AMIC GmbH das erarbeitete Know How auch in andere Branchen (Automobil, Schiffsbau) zu überführen. Die Erweiterung der entwickelten numerischen Konzepte ist durch die verwendete Softwarelösung möglich und wird auch weiterhin vorangetrieben.

Das Know How zur Bestimmung von mechanischen Werkstoffdaten für Aluminiumschaum-Sandwich und die Generierung diesbezüglicher Kompetenzen ermöglicht die künftige Mitwirkung bei der Bearbeitung innovativer Entwicklungsaufgaben für neue Einsatzgebiete von Metallschäumen und deren breite industrielle Anwendung. Numerische Bewertungsanalysen und die im Vorhaben erarbeiteten Kompetenzen zur umfassenden Werkstoffcharakterisierung werden als Dienstleistung und integraler Bestandteil von Wertschöpfungsketten am Markt platziert.

II.3. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Es sind während des Projektes keine vergleichbaren Bauteile in der in diesem Projekt realisierten Bauweise bekannt geworden.

II.4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die Fortschritte und Ergebnisse des Projektes wurden inzwischen bei mehreren Veranstaltungen im Rahmen des Netzwerkes RIO e.V. gezeigt, hier sind unter anderem zu nennen:

- Vorstellung des Projektes auf der InnoTrans 2004 und 2006
- Vorstellung des Projektes auf der Railway Interiors Expo 2004 und 2005
- Green Ventures Kooperationsbörse für Unternehmen der Umwelt- und Energietechnik 2004 bis 2006

Literaturverzeichnis

- /1/ Jahresbericht 2004 zum InnoRegio Projekt RIO – Verbundprojekt Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen, AMIC GmbH, Berlin
- /2/ Jahresbericht 2005 zum InnoRegio Projekt RIO – Verbundprojekt Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen, AMIC GmbH, Berlin
- /3/ DIN 53294: Prüfung von Kernverbunden, Schubversuch, Feb. 1982
- /4/ Abaqus User's Manuals, Version 6.4, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. Pawtucket, RI, USA, 2004
- /5/ Gurson, A. L., "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Materials," Journal of Engineering Materials and Technology, 99(1977), 2–15
- /6/ Tvergaard, V., "Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Condition," International Journal of Fracture Mechanics, 17(1981), 389–407
- /7/ V. S. Deshpande and N. A. Fleck, Isotropic Constitutive Models for Metallic Foams, J. Mech. Phys. Solids. 48(2000), 1253
- /8/ Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, Gibson LG, Hutchinson JW, Wadley HGN. Metal foams: a design guide. London: Butterworth Heinemann, 2000.
- /9/ Gibson, L.J., Ashby, M.F., Cellular solids: structures and properties, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- /10/ X. Badiche, S. Forest, T. Guibert, Y. Bienvenu, J.-D. Bartout, P. Ienny, M. Croset, H. Bernet, Mechanical properties and non-homogeneous deformation of open-cell nickel foams: application of the mechanics of cellular solids and of porous materials, Materials Science and Engineering A289 (2000), 276–288
- /11/ Y. Chastel, E. Hudry, S. Forest, C. Peytour, Mechanical behaviour of aluminium foam for various deformation paths, in: J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck. (eds.), Experiment and Modelling, Metal Foam and Porous Metal Structures, Verlag MIT Publishing, 1999, pp. 263–268. Journées d'Automne de la SF2M, Paris, 1998.
- /12/ O.B. Olurin, N.A. Fleck and M.F. Ashby, Indentation Resistance of an Aluminum Foam, Scripta mater. 43 (2000), 983–989

- /13/ V. S. Deshpande and N. A. Fleck, Isotropic Constitutive Models for Metallic Foams, *J. Mech. Phys. Solids*. 48, 1253 (2000).
- /14/ Kathryn A. Dannemann *, James Lankford Jr., High strain rate compression of closed-cell aluminium foams, *Materials Science and Engineering A293* (2000), 157–164
- /15/ FOAMINAL, Properties Overview and Design Guideline, Fraunhofer IFAM Institute Manufacturing and Advanced Materials, Version 1.4
- /16/ N. Geerlofs, J. Zuidema, J. Sietsma, On the Paris Exponent and Crack Closure Effects of ALPORAS Aluminum Foam, ECF15
- /17/ G. Gioux, T.M. McCormack, L.J. Gibson, Failure of aluminum foams under multiaxial loads, *International Journal of Mechanical Sciences* 42 (2000), 1097-1117
- /18/ I.W. Hall, M. Guden and C.-J. Yu, Crushing of Aluminum Closed Cell Foams: Density and Strain Rate Effects, *Scripta mater.* 43 (2000), 515–521
- /19/ H. Bart-Smith, J.W. Hutchinson, A.G. Evans, Measurement and analysis of the structural performance of cellular metal sandwich construction, *International Journal of Mechanical Sciences* 43 (2001), 1945-1963
- /20/ A.-F. Bastawros, H. Bart-Smith, A. G. Evans, Experimental Analysis of Deformation Mechanics in a Closed-Cell Al Alloy Foam, Division of Engineering and Applied Sciences Harvard University Cambridge, MA 02138 USA November, 1998
- /21/ J. Banhart, J. Baumeister, Das Verformungsverhalten geschäumter Metalle, *Metall* Januar 1997
- /22/ J. Vogel, H. Walter, K. Kreyßig: Druckversuche an Aluminiumschaum-Sandwichproben von IFAM (Charge 01), Arbeitsbericht rio-als-04-12-22, Berlin 2004
- /23/ Dost M. Dost, E. Kieselstein, and R. Erb. Displacement Analysis by Means of Grey Scale Correlation at Digitized Images and Image Sequence Evaluation for Micro and Nanoscale Applications. *Micromaterials and Nanomaterials*, 1(1):30–35, 2002.
- /24/ Keller, J.: Micro- and nanoscale characterization of polymeric materials by means of digital image correlation techniques. Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2005
- /25/ B. Götzinger, R. Kretz: Deformationselemente aus Aluminiumschaum für den Insassenschutz im Personenwagenbau. In Proceedings der 1. Ranshofer Leichtmetalltage „Vom Werkstoff zum Bauteil“, Ranshofen 2000
- /26/ C. Kammer: Schaumschlagen gehört künftig zur hohen Kunst des Konstruierens. *Industrieanzeiger* 2001 H.4, S. 36
- /27/ K. E. Geyer: A new front buffer for suburban railcars. Proceedings of the International Conference „Cellular Metals and Metal Foaming Technology“. Verlag Metall Innovation Technologie MIT, 2001