



Technologiedemonstrator der selbsttragenden Dieselmotoreinhausung [14]

PURtrain – Hybride

Sandwichbauweisen für Schienenfahrzeuge

Leichtbau. Sandwichstrukturen nehmen eine zunehmend wichtige Rolle im Fahrzeugbau ein. Im Folgenden ist die Bauteilentwicklung einer prototypischen, selbsttragenden Dieselmotoreinhausung für den Schienenverkehr beschrieben. Die zum Einsatz kommenden Sandwichstrukturen enthalten funktionsintegrierende Elemente und wurden mit dem Polyurethan-Fasersprühverfahren hergestellt.

JAN KUPPINGER U. A.

Sandwichstrukturen bieten die Möglichkeit, durch optimale Ausnutzung und Kombination spezifischer Werkstoffeigenschaften die mechanischen Eigenschaften, vor allem bei Biegung, zu verbessern und gleichzeitig das Gewicht des Verbunds zu reduzieren. Daher kommen Sandwichstrukturen in der Luftfahrt und Raumfahrt, im Fahrzeug- und Schiffsbau als auch in der Verpackungs- und Bauindustrie zum Einsatz [1–3].

Wesentliches Prinzip einer Sandwichstruktur ist die Anordnung der tragenden Deckschichten in möglichst großer Distanz zur neutralen Biegeachse, da die

ser Abstand ein großes Flächenträgheitsmoment bedingt. Verbunden mit einem hohen Elastizitätsmodul der Deckschichten ergibt sich insgesamt eine hohe Biegesteifigkeit. Des Weiteren nimmt die Kernstruktur Schubbeanspruchung auf, stützt die Deckschichten und verhindert deren Knittern und Beulen. Die Klebeschicht muss die dabei auftretenden Zug- und Scherspannungen zwischen Kern- und Deckschichtmaterial aufnehmen. Nachteilig wirken sich bislang noch unausgereifte Produktionsverfahren zur Herstellung der Sandwichstrukturen und die hohen Herstellkosten, bedingt durch geringe Automatisierungsmöglichkeiten, aus [4].

Eine Möglichkeit der hoch automatisierten, kostenattraktiven Herstellung von Sandwichaufbauten bietet im Bereich der Fertigungsverfahren für Faserkunst-

stoffverbundwerkstoffe das Polyurethan-Fasersprühen [5–7]. Die Vorbereitung des Sandwichaufbaus findet dabei außerhalb der Werkzeugform statt. Dazu wird der benötigte Sandwichkern zwischen die textilen Strukturen eingelegt und beispielsweise mit einem Holzrahmen verspannt. Anschließend wird der vorbereitete Sandwichaufbau mit einem thermisch aktivierten Polyurethansystem beidseitig besprüht. Damit ist sichergestellt, dass die Aushärtungsreaktion erst unter Einwirkung einer entsprechenden Temperatur beginnt und der Sprühauftrag des Materials beendet werden kann, bevor die Vernetzungsreaktion startet. Der Sandwichaufbau wird anschließend in die Werkzeugform eingelegt und die Werkzeugform geschlossen. Bei Werkzeugtemperaturen zwischen 90 und 140 °C startet die Aushärtereaktion. Auf-

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU111156

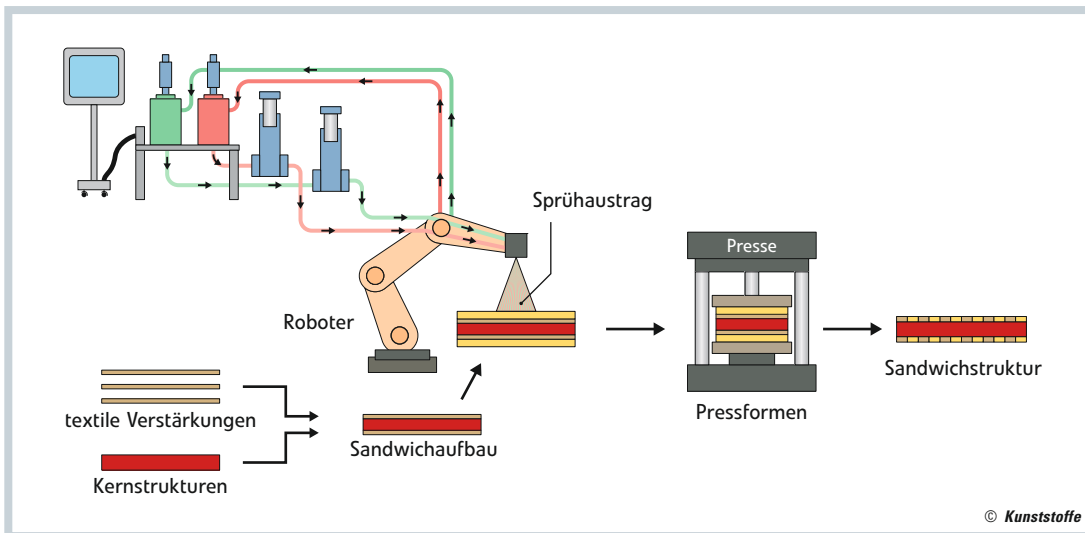


Bild 1. Schematische Darstellung einer Polyurethan-Sandwichherstellung [8]

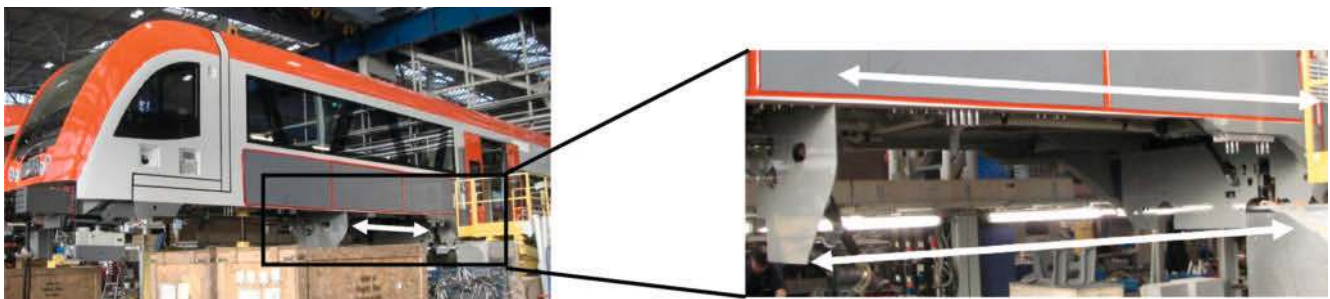


Bild 2. Einbauposition der selbsttragenden Dieselmotoreinhausung [9]

grund des leichten Aufschäumens des Polyurethans erfolgt die Penetration des Polyurethans durch die textilen Strukturen, infiltriert diese und verklebt die textilen Strukturen mit dem Kern. **Bild 1** zeigt die schematische Herstellung der Polyurethan-Sandwichstrukturen.

Entwicklung der selbsttragenden Dieselmotoreinhausung

Mit dem Ziel einer signifikanten Gewichtsreduzierung, in Verbindung mit einem wirtschaftlichen Produktionsverfahren wurde hier das Polyurethan-Fasersprühen ausgewählt. Die Einbauposition der entwickelten Struktur ist in **Bild 2** dargestellt.

Für die Auslegung und Berechnung der selbsttragenden Dieselmotoreinhausung sind Materialeigenschaften an Sandwichprobekörper ermittelt worden. Charakterisiert wurden Sandwichstrukturen mit zwei Lagen der Glasfasermatte der P-D Glasseiden GmbH, Oschatz, vom Typ MA 141 – 300 [10] in jeder Deckschicht und unterschiedlichen flächengewichtsbezogenen Polyurethanaustragsmengen.

Für die Sandwichherstellung wurde ein Polyurethansystem der Bayer Material-

Science AG, Leverkusen, vom Typ Bay-preg [11,12] sowie eine Kernstrukturen der Firma WF Wabenfabrik GmbH, Chemnitz, mit einer Höhe von 20 mm des Typs Testliner, A-Welle [13] und einem Flächengewicht des Papiers von 115 g/m² eingesetzt.

Der Sprühastrag des Polyurethans erfolgte in zwei Schichten. Jede Schicht wurde mit einem Bahnabstand von $d_B = 165$ mm realisiert. Um die unterschiedliche Materialverteilung auf den textilen Strukturen aufgrund des Sprühauftrags auszugleichen, wurde die zweite Schicht um $d_B/2 = 82,5$ mm verschoben (**Bild 3**). Der Abstand von Sprühkopf zur Sandwichdeckschicht betrug 360 mm.

Flamm- und Brandschutzentwicklung

Die entwickelte selbsttragende Dieselmotoreinhausung hat die gestiegenen Flamm- und Brandschutzanforderungen im Schienenverkehr zu erfüllen. Die Bahnnorm CEN/TS 45545 unterteilt verschiedene Bauteilklassen und ihre Verwendung im Zugverkehr. Die selbsttragende Dieselmotoreinhausung wird anhand der Norm der Bauteilgruppe EX 3 zugeordnet, die entsprechende Gefahrenstufe ist HL2.

Anhand von **Tabelle 1** ist zu erkennen, dass drei unterschiedliche Flamm- und Brandschutzprüfungen durchgeführt werden müssen. Es handelt sich hierbei um die Untersuchungen nach den Normen ISO 5658-2, ISO 5659-2 und ISO 5660-1.

In der ISO 5658-2 wird die seitliche Flammausbreitung am Bauteil bewertet. Hierbei muss mindestens ein Critical Heat Flux at extinguishment (CHF) von 20 kW/m² erreicht werden. Ein brennendes Abtropfen darf hierbei nicht erfolgen.

Nach ISO 5659-2 wird die optische Rauchgasdichte und die Rauchgastoxizität ermittelt.

In der ISO 5660-1 wird die maximale Wärmefreisetzungsenergie (MARHE = Maximum Average Rate of Heat Emission) gemessen. Durch eine Vielzahl von Versuchsversuchen auf der Versuchsanlage und entsprechender Brand- und Flammenschutzcharakterisierung wurde ein maximaler Füllstoffanteil von 12 Gew.-% im gesamten Polyurethan festgelegt.

Als feste Flammenschutzmittel kommen hierbei halogen- und bromfreie Mittel zum Einsatz. Unter anderem kam hierbei ein für Polyurethan angepasstes Aluminiumhydroxid, welches durch Abspaltung von Wasser, kühlend und Gas verdün-

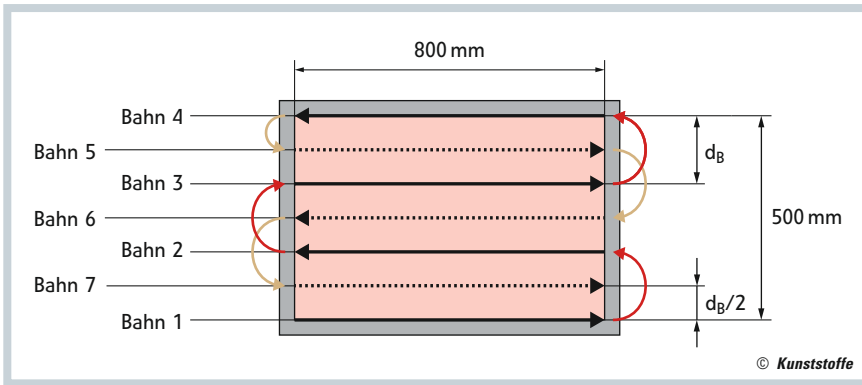


Bild 3. Sprüheintrag zur Herstellung von verpressten faserverstärkten Polyurethan-Prüfplatten und Polyurethan-Sandwichstrukturen [14]

wendet, sowie ein Ammoniumpolyphosphat, welches eine intumeszente Wirkung hat und somit zur Bildung einer flammhemmenden Schicht durch Aufquellen führt und eine weitere Sauerstoffzufuhr verhindert. Die letzten Brandschutzuntersuchungen am Demonstrator zeigen, dass die Normen ISO 5658-2, ISO 5659-2 vollständig erfüllt werden, jedoch der MARHE-Wert leicht überschritten wird. Die Grenzwerte der Brand- und Flammchutzanforderungen sowie die erzielten Ergebnisse sind in **Tabelle 1** dargestellt. Die HL 1 Klassifizierung wird so-

aufgrund des Verpressens wird der Kern in den Anbindungsstellen zur Deckschicht leicht gestaucht. Durch das Auf- und Einschäumen des Polyurethans durch die textile Verstärkungsstruktur und in die Kernstruktur ist nur eine indirekte Bestimmung der Deckschichtdicke t_D möglich (**Bild 4**).

Um möglichst genaue Aussagen über die Deckschichtdicke der Polyurethan-Sandwichstrukturen in Abhängigkeit der aufgetragenen Polyurethanmenge zu erhalten, kam ein Computertomograf (CT) vom Typ Y.CT Precision der Firma Yxlon

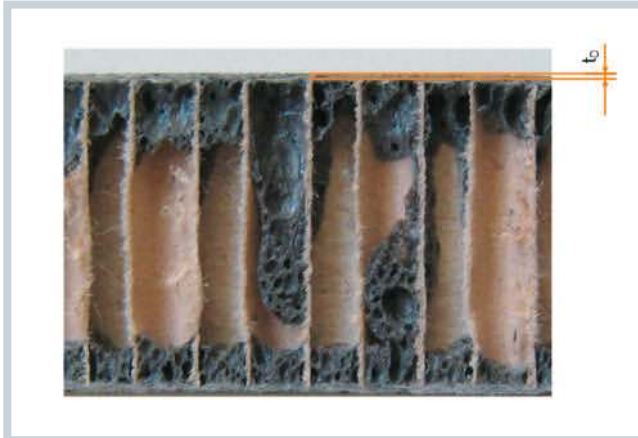


Bild 4. Schnitt durch einen Sandwichprobenkörper [14]

mit erreicht und an einer Verbesserung zum Erreichen der HL 2 Klasse wird derzeit noch gearbeitet.

Charakterisierung der Sandwichstrukturen

Die Deckschichteigenschaften tragen maßgeblich zu den Gesamtsandwicheigenschaften bei. Eine exakte Bestimmung der Deckschichteigenschaften ist daher von großer Bedeutung.

Eine einfache Bestimmung der Deckschichtdicke t_D , bei den mittels Polyurethan-Fasersprühens hergestellten Sandwichstrukturen ist nicht möglich.

International X-Ray GmbH zum Einsatz. Der verwendete Detektor vom Typ Y.XRD1621 hatte eine Bildfläche von 2048x2048 Pixel. Es wurden insgesamt 1920 Projektionen aufgenommen; dies entspricht einer Gradzahl von $0,187^\circ$ zwischen zwei Projektionen. Die Beschleunigungsspannung betrug 70 kV bei einer Stromstärke von 0,05 mA. In **Bild 5** sind exemplarische CT-Aufnahmen der Deckschichten dargestellt.

Mithilfe einer entwickelten Bildauswerterroutine sind die entsprechenden Deckschichtdicken bestimmt worden. Es zeigte sich, dass die Variation des Materialaustrags keinen Einfluss auf die →

Deckschichtdicke der verschiedenen Sandwichkonfigurationen hat. Die Dickenbestimmungen mit einem 600 g/m^2 Glasfaserlattengewicht ergab eine Deckschichtdicke von $545 \mu\text{m}$ (Standardabweichung $32 \mu\text{m}$).

Durch die Bestimmung der mittleren Deckschichtdicken konnten mechanische Deckschichteigenschaften ermittelt werden. Die Zugversuche an den Sandwichdeckschichten zur Charakterisierung ihres Steifigkeits- und Festigkeitsverhaltens wurden bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min in Anlehnung an die DIN ISO 527-1 durchgeführt. Die verwendete Zugprüfmaschine war vom Typ Zwick/Roell ZMART.PRO unter Nutzung einer 20 kN Kraftmessdose. Die Vorkraft betrug 50 N .

Die für die Zugprüfung benötigten Proben wurden durch Zersägen der Sandwichplatten auf eine Breite von 40 mm und einer Länge von 250 mm , durch anschließendes Trennen der Deckschicht vom Kernmaterial ebenfalls durch Zersägen und anschließendem Abschleifen der verbleibenden Reste des Kernmaterials mittels eines Schleifpapiers (Körnung

200) hergestellt. Die Breite der Zugproben von 40 mm wurde gewählt, um einen repräsentativen Querschnitt der Deckschichten zu erhalten.

Bei allen untersuchten Sandwiches sind ähnliche Kennwerte bezüglich der Zugsteifigkeit und Zugfestigkeit, innerhalb der für Faserverbundwerkstoffe akzeptablen Toleranzen, festgestellt worden. Somit hat die auf die Glasfaserlatten aufgebrauchte Polyurethanaustragsmenge keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten. Folglich können die ermittelten Ergebnisse in Abhängigkeit des Glasfaserlattengewichts zusammengefasst und die entsprechenden Mittelwerte gebildet werden [14]. Dabei liegt der Mittelwert des Zug-Elastizitätsmoduls bei 13200 MPa (Standardabweichung 560 MPa) und der Mittelwert der Zugfestigkeit bei 212 MPa (Standardabweichung $6,3 \text{ MPa}$).

Statische Dimensionierung

Für die statische Simulation und entsprechende Berechnung der Sandwichstruk-

tur sind drei verschiedene Varianten von FEM-Modellen mittels des makro-mechanischen Ansatzes, des meso-mechanischen Ansatzes und des abstrahierten Plattenmodells abgeleitet worden. Jedes Modell basiert auf den ermittelten mechanischen Eigenschaften der Deckschicht und wurde mit entsprechenden 4-Punkt-Biegeversuchen validiert. Die FEM-Modelle als auch die Genauigkeit der Berechnung im Vergleich zu den 4-Punkt-Biegeversuchen sind in **Bild 6** dargestellt.

Im Rahmen der betrachteten Simulationsmodelle erweist sich die Nachbildung des Kerns aus Solid-Elementen sowie der Deckschicht aus Schalenelementen in einer dreischichtigen „Blackbox“ (makro-mechanisch) als sehr gutes Abbild der realen Versuchsumstände, wobei die verwendeten Materialkennwerte aus den durchgeführten Versuchen verwendet wurden. Eine Erhöhung der Detaillierung hin zur Nachbildung der Kernstruktur aus Schalenelementen unter Beibehaltung der Deckschichtschalen bildete das globale Verhalten des Sandwich-Verbunds nach

Abkürzung der Anforderungen (Einsatzbereich)	Testmethode	Einheit	Definition der Anforderung	Grenzwerte der Gefahrenstufe (HL2)	Erzielte Ergebnisse
R6 (IN6B; EX 1a; EX3; EX4; EX5; EX6A; EX7; EX8; E2B; E4C)	T02 seitliche Flammbreite (ISO 5658-2)	CHF kWm^{-2}	Minimum	20	21,23
	T03.01 Wärmefreisetzung mittels Cone Calorimeter (ISO 5660-1): 50 kWm^{-2}	MARHE kWm^{-2}	Maximum	90	99,6
	T10.04 max optische Rauchdichte und Rauchtoxizität (ISO 5659-2): 50 kWm^{-2}	$D_s T_{\text{max}}$	Maximum	600	272
	T11.01 optische Rauchdichte und Rauchtoxizität (ISO 5659-2): 50 kWm^{-2}	CIT_G	Maximum	1.8	0,16

Tabelle 1. Anforderungen nach CEN/TS 45545 und erzielte Ergebnisse (Quelle: Bayer MaterialScience)

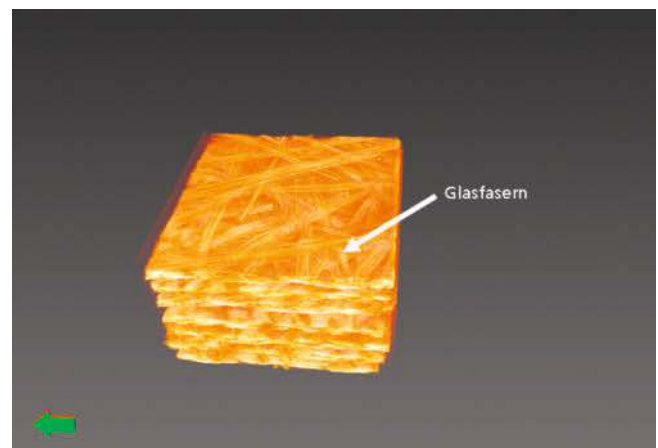
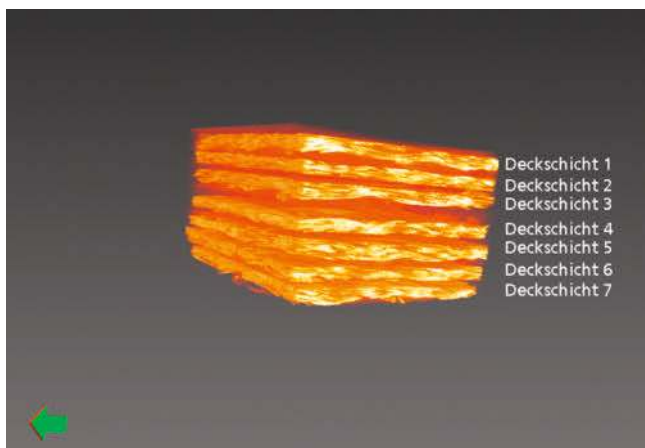


Bild 5. 3D-CT-Aufnahmen der Deckschichten [14]

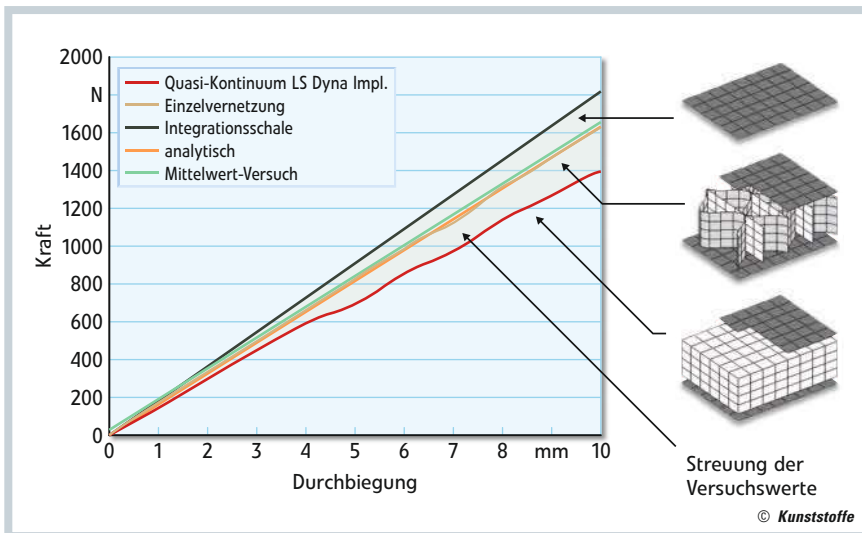


Bild 6. Darstellung der Modellierungsunterschiede an einer Sandwichprobe mit 40 mm Papierwellenkern [15]

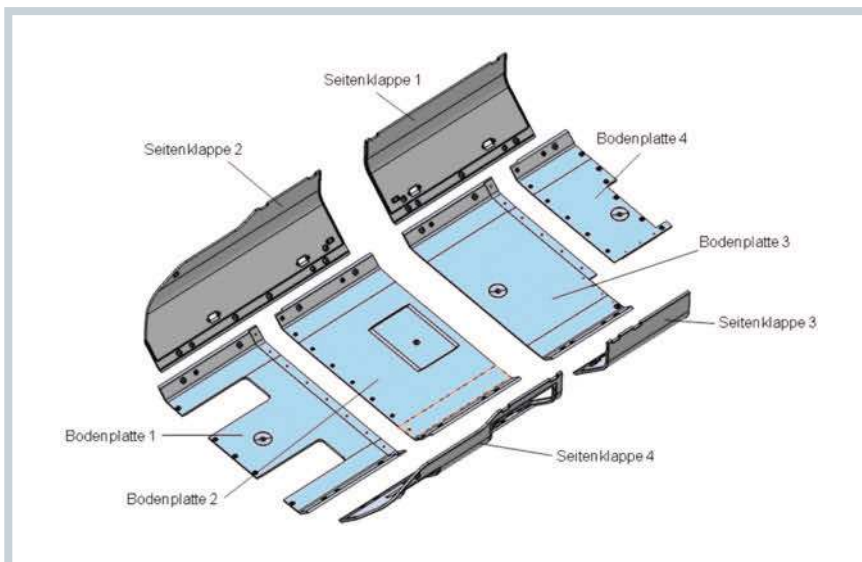


Bild 7. Darstellung der Sandwichplatten und Bezeichnung (Bild: Bombardier)

wie vor sehr gut ab (meso-mechanisch) und kann auch für die Analyse von Kräfteinleitungspunkten und Inserts verwendet werden. Jedoch ist dieser Ansatz durch sehr große Vernetzungsarbeit und -modelle geprägt, sodass die Motoreinhausung damit nicht berechnet werden kann. Eine Erhöhung der Abstraktion des Modells hin zu einer Einzelschicht aus Schalenelementen (abstrahiertes Plattenmodell) lieferte eine zu steife Reaktion des Sandwichverbunds gegenüber dem realen Verhalten. Deshalb ist eine derartige Vergrößerung nur dann anzuraten, wenn die Modellgröße und die Rechenzeit für eine erste Analyse von Konzepten klein gehalten werden muss.

Für die Simulation der Motoreinhausung erfolgte aufgrund dieser Ergebnisse die Auswahl des Berechnungsmodells, bei dem die Kernstruktur als „Blackbox“ mo-

delliert wurde, um zum einen eine gute Genauigkeit und Abschätzung des Versagens zu erreichen und zum anderen die Modellgröße und die Berechnungszeit nicht zu groß werden zu lassen.

Konzeption und Konstruktion des Demonstrators

Die Konstruktion der selbsttragenden Verkleidungsstruktur ist funktions- und fertigungsgerecht ausgeführt. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass nur die schon bisher verfügbaren Schnittstellen für die Verbindung zum Wagenkasten Verwendung finden. Damit ist sichergestellt, dass ein späterer Anbau der selbsttragenden Dieselmotoreinhausung zu Testzwecken möglich ist.

Die entwickelten acht Sandwichbauteile sind in **Bild 7** dargestellt. Die Bo- →

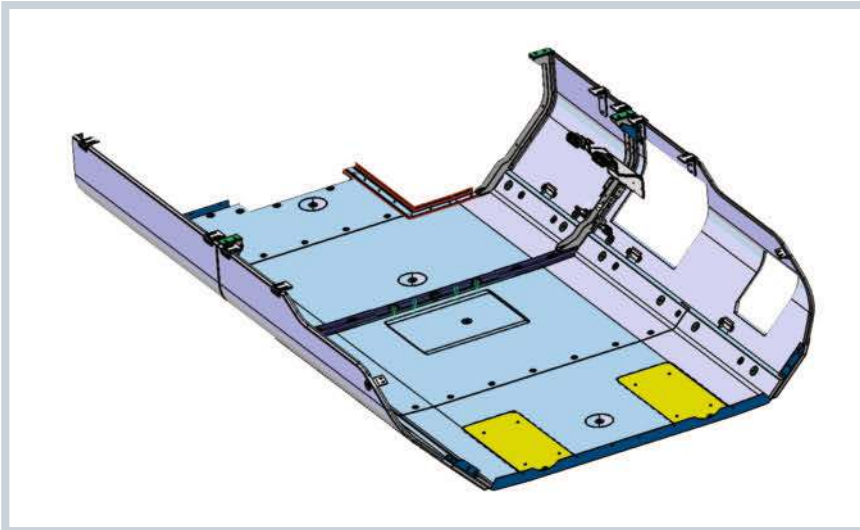


Bild 8. Bodenplatte mit integrierter Isolierung gegenüber den heißen Abgasleitungen (Bild: Bombardier)

denplatten 1 und 2 sowie 3 und 4 können jeweils über eine Laschenverbindung zu einer vom Montagepersonal noch handhabbaren Bodenplattenbaugruppe vormontiert werden. Des Weiteren wurde links und rechts in der Bodenplatte 1 Aufnahmen für eine Isolierung gegenüber den in geringem Abstand darüber verlaufenden heißen Abgasleitungen integriert (**Bild 8**).

Durch den Übergang von der bisher verwendeten Differenzialbauweise zu einer Bauweise unter Verwendung von Sandwichstrukturen konnte die Anzahl der Bauteile erheblich reduziert werden. Dazu beigetragen hat auch die möglich gewordene Funktionsintegration. Beispiele sind die direkt integrierten Aufnahmen für die Griffmulden in den Seitenklappen, Inserts für Verschraubungen, die in den Bodenplatten integrierten Wasser-Ablauföffnungen (mit Schrauben verschließ-

bar) und Einprägungen zu Sicherstellung der lokal notwendigen minimalen Wandabstände sowie für die Aufnahme von Dichtelementen. Zur Herstellung der prototypischen Dieselmotoreinhausung sind im Anschluss an die Designfreigabe acht Aluminiumwerkzeuge bei der KraussMaffei Technology GmbH, München, hergestellt worden. Die Fertigung der Sandwichbauteile sowie die Montage zum Technologiedemonstrator erfolgten bei der DECS GmbH, Sömmerda (**Titelbild**).

Fazit

Die schnittstellengleiche, selbsttragende Dieselmotoreinhausung basierend auf Polyurethan-Sandwichstrukturen ermöglicht eine Gewichtseinsparung zum Referenzbauteil von ca. 35 %. Des Weiteren erfüllt das entwickelte Bauteil die von der Bombardier Transportation GmbH, Hen-

ningsdorf, definierten Anforderungen wie Durchschlagsfestigkeit und maximale Durchbiegung. Die neuesten Flamm- und Brandschutzanforderungen wurden weitestgehend erfüllt. ■

DANK

Die beschriebenen Ergebnisse sind im Projekt "PUR-train – Leichtbau durch funktions-integrierende Strukturen in Multi Material Design" mit dem Förderkennzeichen 03X3019 erarbeitet worden. Das Projekt wurde im Rahmen des Förderprogramms "WING – Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durchgeführt. Hierzu möchten wir dem BMBF für die Unterstützung danken.

LITERATURVERZEICHNIS:

Das Literaturverzeichnis ist kostenlos abrufbar unter www.kunststoffe.de/A079

DIE AUTOREN

DR.-ING. JAN KUPPINGER, geb. 1981, Gruppenleiter Duromerverarbeitung am Fraunhofer Institut für Chemische Technologie, Pfinztal.

PROF. DR.-ING. FRANK HENNING, geb. 1969, Stellvertretender Institutsleiter am Fraunhofer Institut für Chemische Technologie; Lehrstuhlinhaber Institut für Leichtbautechnologie (FAST), Karlsruher Institut für Technologie.

GERHARD KOPP, geb. 1978, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart.

DR.-ING. MARTIN SCHÖN, geb. 1964, R&D Management & Innovation – Division Passengers, Bombardier Transportation GmbH, Hennigsdorf.

DR.-ING. BERND ROTHE, geb. 1980, PUR-INN-MRT, Bayer MaterialScience AG, Leverkusen.

JOSEF RENKL, geb. 1954, Leiter Forschung und Entwicklung, KraussMaffei Technology GmbH, München.