



Kurzbericht

Leitprojekt „Innovative Technologien zur Gestaltung von Last tragenden Leichtbauteilen aus kurzfaserverstärktem Thermoplast mit Endlosfaserverstärkungen am Beispiel eines CNG-Tanks (LLBT)“

Gefördert vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg mit Mitteln der Landesstiftung Baden-Württemberg



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.

in der Helmholtz-Gemeinschaft



Ihre Energie. Unsere Leidenschaft.



Titel	Innovative Technologien zur Gestaltung von Last tragenden Leichtbauteilen aus kurzfaserverstärktem Thermoplast mit Endlosfaserverstärkungen am Beispiel eines CNG-Tanks (LLBT)
Laufzeit	3,5 Jahre (nach Verlängerung)
Auftragsnummer	3824200
Schlüsselwörter	Wabentank, CNG, Spritzguss, Faserverbund
Datum	12.01.2010
Projektleitung	<p>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Fahrzeugkonzepte Pfaffenwaldring 38-40 D-70569 Stuttgart Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich Tel.: +49 (0) 711 / 6862 255 Fax.: +49 (0) 711 / 6862 258 Email: Horst.Friedrich@dlr.de Projektleiter Dipl.-Ing. (FH) Roland Schöll Tel.: +49 (0) 711 / 6862 592 Email: roland.schoell@dlr.de</p>
Projektpartner	<p>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung Dr. sc. techn. Yves Toso Pfaffenwaldring 38-40 D-70569 Stuttgart Tel.: +49 (0) 711 / 68 62 699 Fax.: +49 (0) 711/ 68 62 227 Email: yves.toso@dlr.de</p> <p>Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT Dipl.-Ing. Jan Kuppinger Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7 D-76327 Pfinztal (Berghausen) Tel.: +49 (0) 721 / 4640 448 Email: Jan.Kuppinger@ict.fraunhofer.de</p> <p>IAV GmbH Dipl.-Ing. (FH) Jens Granel Rockwellstraße 3 D-38518 Gifhorn Tel.: +49 (0) 5371 / 805 1299 Email: Jens.Granel@iav.de</p> <p>GasVersorgung Süddeutschland GmbH Dipl.-Wirtsch.-Ing. Marc Pudlatz Am Wallgraben 135 D-70565 Stuttgart Tel.: +49 (0) 711 / 7812 3145 Email: m.pudlatz@gvs-erdgas.de</p>

	<p>Schneider Form GmbH Detlef-Werner Meinecke Kirchheimer Straße 181 D-73265 Dettingen unter Teck Tel.: +49 (0) 7021 / 8080 171 Email: d.meinecke@schneider-form.de</p>		
	<p>Kraus Maffei Technologies GmbH Dipl.-Ing. Martin Würtele Krauss-Maffei-Straße 2 D-80997 München Tel.: +49 (0) 89 / 8899 2799 Email: martin.wuertele@krausmaffei.com</p>		
	<p>E.On Ruhrgas AG Dr.-Ing. Marius Adelt Halturner Strasse 125 D-46284 Dorsten Tel.: +49 (0) 2362 / 93 8619 Email: marius.adelt@eon-ruhrgas.com</p>		
	<p>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Pfaffenwaldring 38-40 D-70569 Stuttgart Dipl.-Ing. Claudia Pápa Tel. : +49 (0) 711 / 6862 512 Email: claudia.papa@dlr.de Matthias Maurer Tel. : +49 (0) 711 / 6862 252 Email: matthias.maurer@dlr.de</p>		
Autoren	DLR - Institut für Fahrzeugkonzepte		
	<p>Dipl.-Ing. Philipp Straßburger Tel.: +49 (0) 711 / 6862 763 philipp.strassburger @dlr.de</p>	<p>Dipl.-Ing. Michael Kriescher Tel.: +49 (0) 711 / 6862 409 michael.kriescher @dlr.de</p>	<p>Dipl.-Ing. Gerhard Kopp Tel.: +49 (0) 711 / 6862 8307 gerhard.kopp@dlr.de</p>
	Dipl.-Ing. (FH) Roland Schöll		
Beiträge von	allen Projektpartnern		
Geprüft durch	Projektpartner		
Freigegeben von	Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich		

Patente und Schutzrechtsanmeldungen

Das Prinzip des Wabentanks beruht auf folgenden DLR-Schutzrechten:

- „Druckgastank“ DE 10217245A1 (Offenlegungsschrift)
- „Druckgastank“ DE 10217246A1 (Offenlegungsschrift)
- „Druckgastank“ DE 10217247A1 (Offenlegungsschrift)

Während des Leitprojektes wurden folgende Patente angemeldet:

- „Vorrichtung zum Legen von Verstärkungsfasern und Verfahren zur Herstellung eines Faserverstärkten Bauteils“ DE 10 2007 020 906 A1

Kurzbericht

Zielsetzung des Leitprojektes „Lastragende Leichtbauteile am Beispiel Gastank“ war die Weiterentwicklung und Untersuchung kurz- und endlosfaserverstärkter Thermoplaste für eine Verwendung in strukturell hoch belasteten Bauteilen. Das Projekt unter der Leitung des DLR Instituts für Fahrzeugkonzepte wurde vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg mit Mitteln der Landesstiftung Baden-Württemberg gefördert. Projektpartner waren das DLR Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, das Fraunhofer Institut für Chemische Technologie, die Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr GmbH, die Firma Schneider-Form GmbH, die Firma Kraus-Maffei Technologies GmbH und die Firma E.ON Ruhrgas.

Ein Gastank in innovativer Wabenbauweise für die Speicherung von Erdgas wurde als Beispiel eines hoch belasteten Bauteils gewählt, um das Potential von kurz- und endlosfaserverstärkten Thermoplasten aufzuzeigen. Im Laufe des Projektes wurde der Gastank konstruiert und berechnet. Der Wabentank ist nach Kugeltank und Zylindertank die konsequente Weiterentwicklung im Hinblick auf die Ausnutzung der für Innendruck geeigneten Geometrie und die Möglichkeit der Anpassung an vorgegebene Bauräume. Voruntersuchungen zu einer solchen Wabenbauweise wurden am DLR Institut für Bauweisen und Konstruktionsforschung im Rahmen eines Vorprojektes durchgeführt [Y. Toso, W. Dudenhausen, T. Schmidt, Abschlussbericht zu dem Projekt Voruntersuchung zu einem formvariablen Hochdruckspeicher (Tank) für gasförmige Kraftstoffe insbesondere CNG „Gastank“]. Das Grundgerüst des Tanks besteht aus einer Stützstruktur aus Carbon-Endlosfasern, die mit einem kurzfaserverstärkten Thermoplast umspritzt wird (Abbildung 1). Dabei dient die Endlosfaserstruktur der Aufnahme der Spannungen in Umfangsrichtung, während der Thermoplast die Spannungen in Axialrichtung aufnehmen soll.

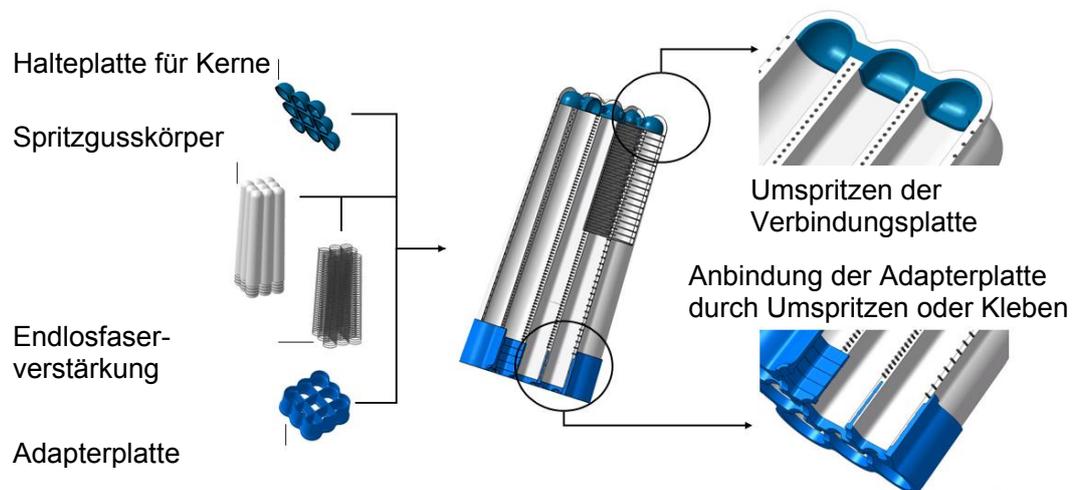


Abbildung 1 Aufbau des kompletten Tanks (schematisch)

Das entwickelte Konzept sieht eine Fügung von zwei Tankhälften mittels Adapterplatte vor. Sie dient weiterhin der Integration von Anschlussbauteilen wie dem Ventil, der Verbindung der einzelnen Zellen des Wabentanks und der Anbindung an die Fahrzeugstruktur. Bei der Fügung der Platte mit dem Thermoplast hat sich das Umspritzen der Adapterplatte durch die formschlüssige Verbindung als beste Lösung zur Anbindung herausgestellt. Zugversuche an umspritzten Aluminiumproben ergaben, dass eine verzahnte Verbindung die beste Festigkeit besitzt. Zudem wird die Anbindung durch den Innendruck so belastet, dass eine zusätzlich dichtende Wirkung eintritt. Eine Halteplatte zur Stabilisierung der Kerne im Spritzgussprozess wird in den Tank integriert. Sie dient des Weiteren der Aufnahme der Spannungen in den Kalotten.

Die Potentialbetrachtungen ergaben im Hinblick auf die in der langfassung des Berichtes definierte Packageeffizienz geringe Vorteile (ca. 1 %) des Wabentanks mit den ausgelegten Wandstärken gegenüber einem CNG-4 Tank in der 2D Betrachtung im quadratischen Bauraum. Höhere Festigkeiten der eingesetzten Werkstoffe würden zu geringeren Wandstärken und somit zu besseren Effizienzen führen. Es wurde aufgezeigt, dass der Wabentank seine konzeptbegründete Bauraumausnutzung erst in komplexen Bauräumen zeigt. Die Verluste durch die An- und Integrationsbauteile sowie die Verluste durch die Auszugsschräge müssten an einem Demonstrator aufgezeigt werden. Der durch den Zielkonflikt von idealer Bauraumnutzung und optimaler Materialausnutzung beim Wabentank zu erwartende Nachteil bei der Gewichtseffizienz im Vergleich zum CNG-4 Tank, wurde in der 2D Betrachtung aufgezeigt. Es wird somit abschließend vermutet, dass bei einer Gesamtsystembetrachtung der Wabentank bei Gewichts- und Packageeffizienz zwischen CNG-4 und CNG-1 Tank einzuordnen ist. Er wird eine bessere Packageeffizienz als der CNG-4 und eine bessere Gewichtseffizienz als der CNG-1 Tank aufweisen.

Umfangreiche Untersuchungen wurden hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und der Verarbeitbarkeit von kurz- und endlosfaserverstärkten Thermoplasten durchgeführt. Es konnten im Projekt zahlreiche Erkenntnisse über Möglichkeiten und Grenzen thermoplastischer Werkstoffe gewonnen werden, sowohl hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit, als auch hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, die die Konzeption und Auslegung solcher Bauteile in Zukunft wesentlich erleichtern werden.

Technologische Schwierigkeiten ergaben sich insbesondere aus der problematischen Verarbeitbarkeit des ursprünglich eingesetzten Materials (Grivory HTV 6H1). Die hohe

Viskosität des Materials führte zu Problemen bei der Formfüllung. Durch eine detaillierte Materialrecherche sowie durch Anpassen der Verarbeitungsparameter konnten mit der Materialvariante IXEF 1022 der Firma Solvay diese Probleme gelöst und ein guter Kompromiss aus hoher Festigkeit und akzeptabler Verarbeitbarkeit gefunden werden. Insbesondere die leicht bessere Fließfähigkeit des Solvay Materials vom Typ 1622 50% SZ im Vergleich zu dem Grivory HTV 6H1 60% und der geringeren Temperaturanfälligkeit im Vergleich zu den anderen Solvay Typen, führten zur Wahl dieses Materialtyp für die weitere Verwendung im Vorhaben „Gastank“. Ein weiterer Aspekt ist, dass der Verarbeitungstemperaturbereich der Solvay-Materialien um 60-80 °C niedriger liegt als bei dem Grivory-Material. Dies erleichtert die Verarbeitung deutlich, da es sich beim Temperaturbereich des Grivory-Materials (ca. 360°C) um einen Extrembereich handelt und es deshalb leichter zu Verarbeitungsproblemen kommen kann.

Es wurden unterschiedliche Varianten der Spritzgusstechnik, wie das Gegentakten (GTS) und das Überströmen der Kavität, auf ihre Eignung hin untersucht. Die Versuche zeigten, dass das Gegentakverfahren mit den beiden verarbeiteten Materialien (Grivory und IXEF) keinen bzw. einen nur sehr geringen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat und zudem prozesstechnisch nicht oder nur sehr schwer beherrschbar ist. Im Hinblick auf die generierten Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass sich das GTS-Verfahren zur Herstellung orientierter, hochgefüllter kurzglasfaserverstärkter Polyamide nicht eignet. Belegt wird dieses Ergebnis zudem durch die hohen verarbeitungstechnischen Anforderungen des teilaromatischen kurzglasfaserverstärkten Polyamids und der schwierigen Verarbeitbarkeit beim herkömmlichen kontinuierlichen Spritzgussprozess mit Standardwerkzeug und -maschinen. Auch das Überströmen der Kavität brachte keine Verbesserung und hat einen großen Materialverbrauch, was bei einem hohen Materialpreis für die einsetzbaren technischen Thermoplaste ein entscheidender Nachteil ist. Daher ist das Überströmen von Kavitäten ebenfalls kein taugliches Fertigungsverfahren für die Herstellung eines kurz- und endlosfaserverstärkten CNG-Tanks.

Einspritzsimulationen zeigten, dass bei dieser dünnen Bauteilgeometrie keine realistischen Simulationsergebnisse zu erwarten sind. Berechnete Faserorientierungen in Modellrohrproben stimmen nicht mit den Orientierungen in untersuchten Rohrkörpern überein. Faserorientierungen als Basis für nachfolgende strukturmechanische Festigkeitsberechnungen konnten somit nicht mit der während

der Projektlaufzeit zur Verfügung gestandenen Moldflow MPI 6.2 Version berechneten werden.

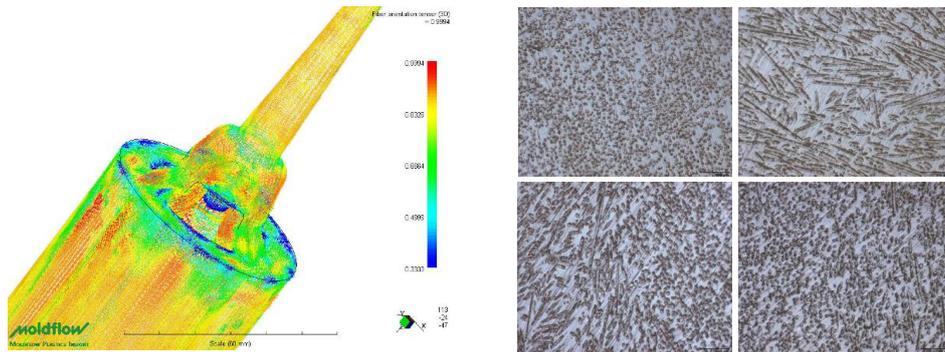


Abbildung 2 Vergleich der Faserorientierung aus Simulation und an Proberohrkörpern

Die Materialcharakterisierung des verwendeten Thermoplasts erfolgte sowohl eindimensional an Zugproben als auch mehrdimensional an Rohrproben.

Die Zugproben wurden bei Raumtemperatur, bei -40 °C und bei 85 °C getestet, um eine breite Temperaturspanne des möglichen Einsatzbereiches abzudecken. Es stellte sich heraus, dass für diesen Belastungsfall das Material IXEF mit 50 % Glasfaseranteil die beste Performance hatte. Es ist jedoch in weiteren Betrachtungen zu bedenken, dass selbst bei idealer Faserorientierung es bei Temperaturen von 80 °C zu einem Abfall der Festigkeit auf 160 MPa kommt.

Die biaxialen Belastungsversuche der kurzfaserverstärkten Thermoplastrohrproben ergaben, dass den Quer- bzw. Umfangsspannungen durch Innendruck relativ hohe axiale bzw. Längsspannungen überlagert werden können, bevor eine Reduktion des Berstdrucks gemessen wird. Beispielsweise ertragen die Rohre noch die gleichen Umfangs- bzw. Querspannungen wie bei reiner Innendruckbelastung, wenn gleichzeitig Längsspannungen in einer Höhe von über 50 % der axialen Zugfestigkeit überlagert werden (Abbildung 3).

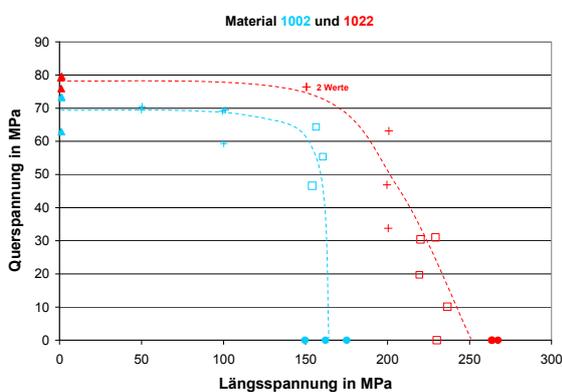
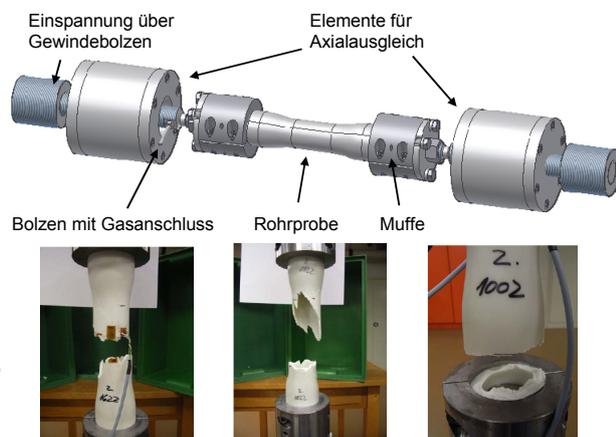


Abbildung 3 Biaxiale Belastungsversuche



Zwei Varianten für die Erstellung der Halbzeuge für das „Skelett“ mit 2 mm Durchmesser wurden, wie zunächst für die Endlosfaserstruktur angedacht, entwickelt.

Eine Variante zur Herstellung der Faserverbundstäbchen erfolgte durch Ziehen von Faserrovings mittels eines Raupenabzugs durch eine Imprägniereinheit und durch eine Kalibriereinheit. Hiermit konnten Endlosfaserstäbchen in zufriedenstellender Qualität gefertigt werden. Die Oberfläche war glatt und zeigte eine gleichmäßige Matrixverteilung, so dass die Stäbchen trotz des geringen Matrixanteils eine gute Knickstabilität aufwiesen. Der Faservolumenanteil konnte mittels Mikrowellenveraschung bestimmt werden und beträgt 44 %. Die mechanischen Kennwerte der Stäbchen wurden auf einer Zugprüfmaschine bestimmt. Dabei wurden die Stäbchen in speziell hierfür gefertigten Halterungen eingeklebt und getestet. Die aus dem Zugversuch gewonnen mechanischen Kennwerte betragen für den mittleren Zug- E-Modul 60477 MPa und für die mittlere Zugfestigkeit 1585 MPa. Die gute Prozesssicherheit dieses Verfahrens konnte durch die kontinuierlicher Herstellung von ca. 400 m imprägnierten Endlosfasern gezeigt werden. Jedoch muss für eine wirtschaftliche Herstellung der benötigten Halbzeuge noch an einer Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit von momentan 0,8 m/min für die Wicklung des Fasereinlegers gearbeitet werden.

In der zweiten Variante wurde die Faserverbundrovingstärke über Verschmelzen von auf dem Markt verfügbaren Carbonfaser-PA-Hybridgarnrovings mittels Heizkonzept über Infrarot und verjüngte, beheizte Messingdüsen realisiert. Es konnten knickstabile Faserverbundstäbchen mit rundem Querschnitt und glatter Oberfläche aus 4 Carbonfaser-PA-Hybridgarnrovings mit einem Faservolumengehalt von 75 % hergestellt werden. Anschließend wurde eine 3-Punkt-Biegeprüfung durchgeführt. Die Resultate bzgl. Höchstkraft und E-Modul waren laut Projektpartner entsprechend den gängigen Werten für carbonfaserverstärkte Thermoplaste.

Untersuchungen an Spritzgussplatten mit eingelegter Endlosfaserverstärkung zeigten die fertigungstechnischen Schwierigkeiten auf. Der durch den Glasfaseranteil hochviskose Werkstoff benötigt hohe Einspritzdrücke und führt somit zu großen Kräften auf die Endlosfasereinleger. Bedingt durch die gemeinsame Einspannung ist es nicht möglich, die Fasern gleichmäßig stark vorzuspannen. Durch die hohen Temperaturen und Drücke im Spritzgussprozess verformen sich die Einleger deutlich (Abbildung 4). Verschiebungen der Fasern im Tank würden Schwachstellen verursachen und müssen somit zwingend verhindert werden.

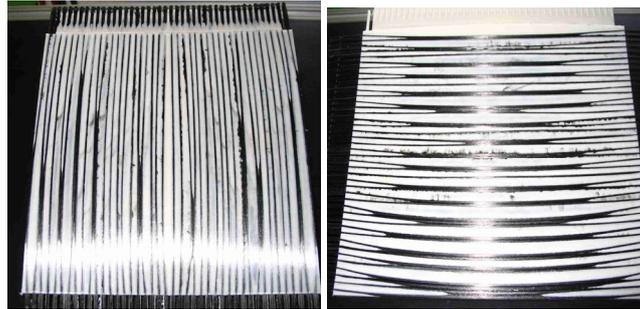


Abbildung 4 Platten mit Faserstäbchen aus IXEF mit Faserstäbchen am Bauteilrand

Durch den Aufbau der Endlosfaserstruktur stützen sich die Endlosfasern bereits an den Kreuzungspunkten ab. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dies nicht ausreichend ist. Ein möglicher Ansatz ist, dass eine entsprechende Oberflächenstruktur der Kerne in Verbindung mit ihrer zum Entformen notwendigen konischen Form und angepasste Halteelemente, die Endlosfaser des Einlegerteils in Position hält. Nach dem Umspritzen liegt die Faser des Einlegers auf der Bauteilinnenfläche, eingebettet im Kunststoff. In einem zweiten Schritt wird nun die Tankhälfte nochmals innen mit Kunststoff überspritzt. Das wird erreicht durch einen entsprechend kleineren Kern im Spritzgießwerkzeug. Eventuelle Löcher von Halteelementen für die Endlosfaser werden dabei verschlossen.

Die Simulationen des Gesamtgastanks ergaben, dass die Dimensionierung mit den im Bericht genannten Materialdaten nicht ganz ausreichen gewählt wurde. Die Überschreitungen der maximalen Zugfestigkeit sind in einem kalkulierbaren Rahmen, und können somit durch Anpassung des Faserdurchmessers, wählen einer höherfesten Faser oder durch Erhöhung des Fasergehaltes, durch Komprimierung der Fasern in den Knotenbereichen, kompensiert werden. Die Möglichkeit der Komprimierung wurde im Rahmen des Projektes fertigungstechnisch noch nicht untersucht. Der festgelegte Zeitrahmen für die Gesamtsimulation ließ keine Schleifen zur gesicherten Auslegung zu. Um zu ermitteln, wie sich die Kurzfasern in der Thermoplastmatrix um die Umfangswicklung anordnen werden, sind Spritzgussversuche am gesamten Tank notwendig. Es ist daher zum jetzigen Zeitpunkt schwierig detaillierte Aussagen zum Versagen der Matrix zu treffen. Die Dimensionierung oder Materialwahl der Adapterplatte muss überarbeitet werden. Die Verbindung zwischen Adapterplatte und Thermoplastmatrix konnte während des Projektes nicht detailliert genug untersucht werden, um eine ausreichende Dimensionierung zu bestätigen und muss genauer betrachtet werden.

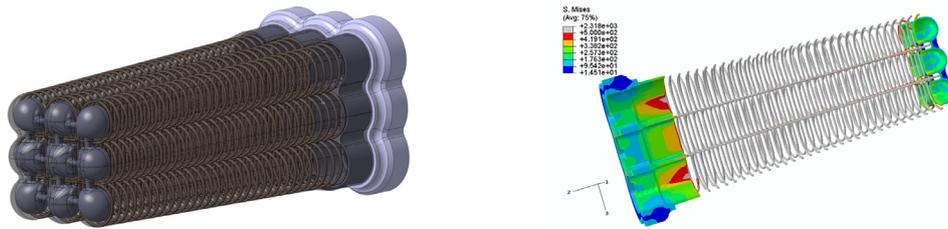


Abbildung 5 Simulationsmodell des Gesamtgastanks

Die Bemühungen, die Faserstruktur vollautomatisiert herzustellen, führten zu dem Ergebnis, dass, um ein akzeptables Ergebnis zu erlangen, noch intensive Forschungsarbeiten nötig sind. Herausforderungen hierbei sind die prinzipbedingte komplexe Legegeometrie und die Erwärmung des Rovings, da dieser während des Legens der Struktur auf die Schmelztemperatur des Thermoplasten erhitzt werden muss. Mögliche Ansätze, die aus Kosten-, Zeit- und Kapazitätsgründen nicht bis zum Erfolg erforscht werden konnten, wie das Legen mittels Fused Deposit Modeling oder das automatische Umwickeln eines Kernes, sind im Bericht detaillierter beschrieben. Die aufgezeigten Ergebnisse können in nachfolgenden Projekten als Ansatzpunkte der automatisierten Fertigung dienen.

Auf Grund der Projektlaufzeit, notwendiger zusätzlicher Arbeiten bei der Materialuntersuchung sowie den Fertigungsrestriktionen und den finanziellen Mitteln konnte auch der 3x3-Demonstrator nicht im Rahmen des Projektes realisiert werden. (Durch den Ausstieg der Firmen TI Automotive und der Firma GVS während des Projektes, fehlten rund 260 T€ an Eigenleistung und Sachmitteln im Projekt.)

Untersuchungen bezüglich der Herstellungskosten ergaben, dass neben dem Spritzgussverfahren auch eine Fertigung auf duroplastischer Basis für bestimmte Stückzahlen eine wirtschaftlich geeignete Variante darstellt. Weiterer Vorteil ist, dass mit „auswaschbaren“ Kernen keine Auszugsschräge erforderlich wäre. Somit könnte die Duroplastvariante noch besser an Bauräume angepasst werden und bessere Packageeffizienzen erreichen. Auch eine Kernhalteplatte ist beim Herstellungskonzept in Duroplast nicht zwingend erforderlich und würde weitere Gewichtsoptimierungen ermöglichen. Aufgrund der zuvor beschriebenen Risiken sowie der hohen Kosten für ein Spritzgusswerkzeug wurde am DLR ein Konzept für die Herstellung und den Test eines Wabentanks aus Duroplast entwickelt.

In Anbetracht des hohen Interesses der Industrie an einem solchen Wabentank soll dieses Konzept DLR-intern innerhalb nur eines Jahres zu einem funktionsfähigen

Demonstrator umgesetzt und getestet werden. Die Finanzierung hierfür übernimmt das Technologiemarketing des DLR. Zahlreiche Gespräche mit Anwendern bestätigten die Attraktivität des bearbeiteten Konzeptes und lassen – aufgrund der gefundenen Wissenszuwächse im Projekt und der weiterführend beabsichtigten Entwicklungsleistungen – eine spätere wirtschaftliche Verwendungsmöglichkeit erkennen.

Die Projektpartner und Autoren danken der Landesstiftung Baden Württemberg und dem Wirtschaftsministerium Baden Württemberg für die Unterstützung im Projekt „Innovative Technologien zur Gestaltung von Last tragenden Leichtbauteilen aus kurzfaserverstärktem Thermoplast mit Endlosfaserverstärkungen am Beispiel eines CNG-Tanks (LLBT)“