

DAS BESTE ALLER BUSGEHÄUSE ENTSTAND IN TEAMARBEIT

Originalhersteller hält engen Entwicklungszeitplan für die superleichte, aus mehreren Teilen geformte Schale zum Ausgleich des Gewichts des Antriebssystems in einem brennstoffgetriebenen Linienbus ein.



Der elektrische Bus *EcoRide* BE35 mit Brennstoffzellenantrieb, konzipiert von dem Massenverkehrs-Originalhersteller Proterra LLC (Golden, Colo.), nutzt und verbessert vorherige Versuche, brennstoffsparende Massenverkehrsfahrzeuge zu bauen.

Der im Oktober 2008 eingeführte Elektrobus *EcoRide* BE35 mit Brennstoffzellenantrieb von Proterra LLC aus Golden, Colorado, könnte sich als einer der besten brennstoffeffizienten Massenverkehrs-Designs der Branche herausstellen. Dieses Projekt wurde im Mai 2007 gemeinsam mit einem Preis der Bundestransportbehörde der USA lanciert und ermöglichte es einem Team unter Führung des in Atlanta ansässigen Center for Transportation and the Environment (CTE), an dem Nationalen Brennstoffzellenprogramm NFCBP teilzunehmen. Der Verkehrsfahrzeugspezialist Proterra, der damals unter dem Namen Mobile Energy Solutions LLC firmierte, wurde mit der Entwicklung eines Prototyps beauftragt, die von dem NFCBP mit vielen Millionen Dollars finanziert wurde, die in 2005 genehmigt wurden, als der amerikanische Kongress das Gesetz über Beteiligungen an sicheren, kostengünstigen, flexiblen und effizienten Transportmitteln verabschiedete.

EcoRide stellt eine logische Fortführung des Know-hows dar, das die Verkehrsbranche in mehreren früheren Busprojekten erworben hat. Am wichtigsten für Proterras Designbemühungen waren frühere Erfahrungen mit den 13,7 m - Shuttle-Bussen *EcoMark*, die seit 2002 erlösbringend beim Einkaufszentrum der 16th street in Denver, Colorado, eingesetzt werden. Dale Hill, der Präsident und Technische Leiter von Proterra, einer der treibenden Kräfte hinter dem *EcoMark*-Projekt, bemerkt, dass die 36 niedriggelegten Busse „in den ersten sieben Jahren über 175 Mio. Passagiere befördert haben, und dies aufgrund ihres serienmäßigen Designs auf der Basis von Hybridstrom mit komprimiertem Naturgas (CNG) mit stark reduzierten Emissionen“. Das Projekt des NFCBP aktualisiert das Shuttle-Buskonzept in einem 10,6m-Format. Der Motor auf CNG-Basis wird ersetzt durch ein Wasserstoffantriebssystem (Fab Industries, Anniston, Ala.) mit durch filamentgewebte Carbonfaser armierten Speichertanks, zwei 16 kW-Brennstoffzellen (Hydrogenics, Mississauga, Ontario, Canada) und einem elektrischen Powerphase-Antriebssystem, das von UQM Technologies (Frederick, Colo.) gebaut wurde. Ein Composite-Gehäuse ersetzte den stählernen Eingehäuserahmen und die im Gehäuse des *EcoMark* verwendeten inneren und äußeren, höchst stoßresistenten Schalen. Das Composite-Gehäuse gleicht das Gewicht der Wasserstofftanks und der Batterien aus und optimiert den für deren Unterbringung benötigten Raum. Dadurch kann das neue Fahrzeug die Reichweite von 482 km erreichen, die im normalen täglichen Busverkehrsbetrieb benötigt wird.

AUS DEN ERFAHRUNGEN ANDERER GELERNT

Proterra analysierte die besten früheren Busgehäuse und konnte so aus früheren Erfahrungen lernen und dies in der Designphase anwenden. Unter diesen befanden sich (in der Reihenfolge ihrer Entwicklung) der *Metroliner* in Deutschland; ein Bus, der ursprünglich von dem inzwischen nicht mehr bestehenden Unternehmen Neoplan USA in Lamar, Colo. gebaut wurde; der Advanced Technology Transit Bus (ATTB) des Southern California Rapid Transit Districts (SCRTD); und zwei Entwürfe der North American Bus Industries (NABI, Anniston, Ala.), darunter den *CompoBus*, der jetzt erlösbringend von der Städtischen Verkehrsbehörde von Los Angeles County eingesetzt wird. Obwohl einige der Designs nur in sehr beschränkter Anzahl produziert und kaum oder gar nicht erlösbringend eingesetzt wurden, zog der *CompoBus* ursprünglich ein Bestellvolumen von 100 Bussen für den Großraum Los Angeles und 20 für Phoenix auf sich. Los Angeles hat vor kurzem weitere 260 Stück bestellt, mit einer weiteren Option auf die dreifache Menge. Es sollte erwähnt werden, dass die beiden

bedeutendsten bis heute in Nordamerika eingesetzten Designs der ATTB und der *CompoBus* sind. Jeder von ihnen hat ein integriertes Voll-Composite-Gehäuse/-Chassis, an das die Metallaufhängung/das Antriebssystem direkt montiert wurde. Die oft anekdotischen Betriebsergebnisse, die für diese Composite-Busse verfügbar waren, stützten deutlich Proterras Entscheidung, mit einem Voll-Composite-Gehäusedesign weiterzuarbeiten, das mit kleineren, aus Metall gefertigten Chassisstrukturen verbunden war.

Einige Bedenken, die dem Einsatz von Compositen als den wichtigsten Bausteinen des Gehäusedesigns bei früheren Gehäuse-Verkehrsanwendungen im Wege hätten stehen können, waren beseitigt. Zum Beispiel hatten die Programme ATTB und *CompoBus* Bedenken über die seitliche Stoßfestigkeit und Reparaturfähigkeit aus dem Weg geräumt und Proterra somit die Konzentration auf konkretere Fragen ermöglicht. Die wichtigsten davon waren die Unterbringung der gleichen Anzahl von Sitzen (37) wie bei längeren 12,2m-Bussen, um die Vorschriften für Busdesign des Amerikanischen Verbands für Öffentlichen Verkehr (APTA, Washington, D.C.) einzuhalten, die Erzielung eines besonderen „Look“ und die Optimierung der Rohkarosserie des Busses in Bezug auf Kosten und Produzierbarkeit innerhalb dieser Parameter.

Proterra beauftragte ein Team von internen Mitarbeitern mit den Designaufgaben, bezog aber schon in einem frühen Stadium wichtige externe Beratungsunternehmen mit ein, darunter Peak Composites (Arvada, Colo.) und Ultimate Composite Analysis (Piedmont, Calif.) sowie den Armierungslieferanten SAERTEX USA (Huntersville, N.C.). Die Urheberrolle bei dem Projekt lag in diesem Zusammenhang bei Proterras leitendem Gehäuseingenieur. Diese Stellung umfasste die gesamte Designverantwortung für das Composite-Gehäuse. Konzeption, mechanische und elektrische Designkonfiguration, solide Modellierung und vorläufige strukturelle Analysefunktionen wurden intern bei Proterra durchgeführt. Die Mitarbeiter von SAERTEX USA lieferten Unterstützung, ebenso wie ein Team von Composite-Beratern und von Proterra zusammengestellten Experten in Finiter Elemente-Analyse (FEA). Viele der Teammitglieder hatten Erfahrung in drei der oben erwähnten Composite-Busdesigns, somit waren sie bestens geeignet, die interne Analyse zu überprüfen und zu bestätigen.

FEA war ein Schlüsselinstrument beim Design des Busses. Es wurden mehrere Beladungsszenarien untersucht, bevor die endgültige Entscheidung über das grundlegende Gehäusedesign getroffen wurde. Darunter waren Betriebslasten, die von der Straßenoberfläche über die Aufhängung einwirkten (geschätzt mit Hilfe der TruckSim-Software von Mechanical Simulation Corp., Ann Arbor, Mich.), sowie die Anhebung an den Ecken, das Abschleppen, seitliche Einwirkungen und Überrollbelastungen. Da die einheitlichen Überrollstandards mit Dachbelastung bei Linienbussen historisch daran ausgerichtet sind, die Überrollstandards für Schulbusse zu erreichen, beschloss Proterra, sich beim Design an dem aktuellen Standard für Schulbusse in Colorado zu orientieren, der bedeutend anspruchsvoller ist als der für Linienbusse. Peak Composites und Ultimate Composite Analysis führten getrennt voneinander umfassende Modellierungen Finiter Elemente durch, wobei der Erstere Nei Nastran (Nei Software Westminster, Kalifornien, ehemals Noran Engineering) und der Letztere ANSYS (ANSYS Inc., Canonsburg, Pa.) verwendete. Diese Strategie stellt sich als vorteilhaft heraus, denn die sehr enge Übereinstimmung der aus den beiden Analysen gewonnenen Ergebnisse stärkte Proterras Vertrauen in das endgültige Design.

Laut Peak Composites „ist das Design und die Herstellung eines voll funktionsfähigen Composite-Busses in der Umsetzung ein riesiges Projekt, und es ist wichtig, von vornherein soviel wie möglich über das Endprodukt zu wissen. Das Modell der gesamten Busstruktur erlaubte uns, Bereiche hoher Belastung unter verschiedenen Ladebedingungen vorherzusagen und schnell Änderungen vorzunehmen, wo dies notwendig war, um Bereiche struktureller Verwundbarkeit zu verbessern“.



EcoRide BE35, von hinten gesehen, wird auf der Teststecke der Busforschungs- und Testeinrichtung in Altoona, Pa., Tests der US-Verkehrsbehörde über seinen Brennstoffverbrauch unterzogen. Er zeigte eine Verbesserung bei Brennstoffeinsparungen gegenüber vergleichbaren Diesel-getriebenen konventionellen Bussen von bis zu 400 Prozent, vorwiegend dank seines leichten Composite-Gehäuses.

Die Experten von SAERTEX USA stimmen zu, dass „auf der Basis vergangener Designerfahrungen mit allen anderen Voll-Composite-Linienbusgehäusen und Komponenten die aus diesen früheren Programmen gewonnenen Lehren einfach und leicht in dieses batteriebasierte Brennstoffzellen-Modell übernommen wurden und dabei halfen, den gesamten Design- und Analyseanteil des Zeitplans einheitlich abzuwickeln.“

Die Strukturanalyse wurde Hand in Hand mit Proterras solider Modellierung des Busgehäuses durchgeführt, die mit der SolidWorks-Software von Dassault Systemes (Suresnes, Frankreich) fertiggestellt wurde. So bedeutete z.B. die von der sich nach vorne öffnenden Vordertür geforderten ästhetischen und funktionalen Eigenschaften, dass bestimmte Elemente in oder nahe der A-Säule montiert werden mussten. Das SolidWorks-Modell lieferte eine Kontrolle der physischen Konzeption und der Abstände ebenso wie die Oberflächegeometrie, die schnell vorgefertigt und für die Finite-Elemente-Software integriert werden konnte. Die Ergebnisse der Strukturanalyse dagegen führten zu Änderungen im soliden Modell und dem entsprechenden Ausstellungsmodell in Echtgröße. Dieses kontinuierliche Zusammenspiel zwischen Designern und Ingenieuren führte zu einem optimalen Gehäusedesign.

AUSWAHL UND OPTIMIERUNG DER MATERIALIEN

Die Auswahl der Materialien, die Integration der Lieferanten und strukturelle Überlegungen wurden in einem iterativen Prozess während des Designs behandelt. Einige zentrale Anliegen verdienen hier, betont zu werden. Erstens führten Kostenanforderungen das Design des Busgehäuses in Richtung einer kontinuierlichen, durch E-Glasfaser armierten Composite-Gehäuseschale. Zweitens zwangen die Anforderungen des Zeitplans und der Wunsch, Flexibilität für die Anpassung des „Looks“ des Busses bis spät in den Designprozess hinein aufrechtzuerhalten, dazu, viele sekundäre Teile, wie Tankdeckel und Zugangstüren, per Hand zu montieren, wobei Armierungen aus kontinuierlichen E-Glas-Schnittmatten und Gelegen zur Anwendung kamen.

Angesichts des ehrgeizigen Entwicklungszeitplans des CTE war es entscheidend, dass die ausgewählten Materialien nachweislich als leistungsfähig galten, denn es gab wenig Zeit für Materialanalysen. SAERTEX USA bot eine vollständige Palette geeigneter Materialien an, und das technische Unterstützungsteam des Unternehmens arbeitete während der Phasen des/der Composite-/Komponentendesigns, -analyse und -verfahrenskonzeption direkt mit dem Designteam von Proterra zusammen. Besonders relevant für dieses Projekt waren die faltenfreien vernähten Gelege (NCF) von SAERTEX. Diese Armierungen werden aus Schichten einseitig ausgerichteter statt gewebter Gelege hergestellt. Im Gegensatz zum Weben kräuselt das Vernähen die

Gelege nicht. Aus diesem Grund zeigen die Materialien praktisch keine Verlängerung in die Richtung der Faserausrichtung, wodurch es möglich wird, die Festigkeit des Geleges im Endprodukt zu optimieren und damit eine höhere Dauerhaftigkeit (Widerstand gegen Ermüdung) als bei den gekräuselten Fasern in konventionellen Geweben zu erzielen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, mehrschichtige Schichten mit quasi-isotropischen Strukturen herzustellen, wie z.B. die, die Proterra für sein Voll-Composite-Linienbusgehäuse vorgegeben hat.



1. In der DLBA- Automatisierungseinrichtung wird das CNC-Roboter-Frässystem von Proterras 3-D-Solidmodellsystem aus programmiert, um die Formung des Busgehäuseprofils vorzubereiten.



2. Die obere Hälfte des Busgehäuseprofils wird fast bis zur Endform zurechtgeschnitten. Das Profil des unteren Gehäuses wird in ähnlicher Weise zugeschnitten, dann werden das obere und das untere Profil zusammengesetzt.



3. Das fertige und oberflächenbehandelte Profil des Hauptbusgehäuses wird im Pearson Composite-Werk noch einmal abschließend poliert, um die Herstellung der Form vorzubereiten.



4. Ein Techniker von Pearson Composites überprüft die Auflage für eine der Formen, die dann von dem Profil des Hauptbusgehäuses gezogen wird.



5. Die fertige Oberfläche des oberen Profils des Composite-Gehäuses wird von Technikern bei C&C Fiberglass für die Formung eines Teils vorbereitet.



6. Die fertige Schale des Composite-Busgehäuses trifft mit dem Lastwagen am Werk von Proterra LLC in Golden, Colo. ein.

NFCs sind verfügbar in E-Glas, S2-Glas, Aramid- und/oder Carbonkonstruktionen, mit Gewichten von 300 gsm bis 3.000 gsm und in einachsigen, zweiachsigen und dreiachsigen Faserausrichtungen. Viele dieser Konfigurationen wurden in dem CTE-Bus verwendet. In einem späteren Stadium des Designprozesses wurden Carbonfasergelege lokal verwendet, da deren Notwendigkeit während der FEA-Simulationen erkannt wurde, um kritische Belastungsansprüche bei Überrollfällen, der Anhebung an den Ecken und anderen Fällen zu erfüllen.

DIE WERKZEUGFERTIGUNG

Nachdem das SolidWorks-Modell und die Auswahl des Strukturdesigns und des Grundmaterials beendet waren, wurde das Profil des Busgehäuses von DLBA Robotics (Chesapeake, Va.) dupliziert, ebenso wie die Profile für einige der komplexeren Dachverkleidungen und inneren Bodenabschnitte. Das Modell für die Busgehäuseoberfläche wurde von SolidWorks zu DLBA Robotics exportiert, damit es in deren dualen CNC-Fräserroboterarmen (IRB 6400-Roboter von ABB Ltd., Zürich, Schweiz, auf einem Frässystem von Proventia Production Technologies Oy, Oulansalo, Finnland) verwendet werden konnte.

Die Profile wurden auf einem Stahlrahmen konstruiert, der mit einer 2 lb/ft³-Schaumschicht aus Polyisocyanurat bedeckt war, die von ITW Insulation Systems (Houston, Texas) hergestellt wurde. Der Schaum hat einen

Hinterschnitt bei nominalen 12,7 mm und ist mit Glasfaser und einem Poyfair T27-maschinengängigen Werkzeugharz (ATC Formulated Polymers Inc., Burlington, Ontario, Kanada) bedeckt und noch ein letztes Mal maschinell bearbeitet, um zu dem Modell von SolidWorks zu passen.

Das Busgehäuseprofil wurde mit einem dreiphasigen Duratec-System beschichtet (Hawkeye Industries, Bloomington, Kalif.) und poliert, um die fertige Endoberfläche zu erhalten, bevor die Form gefertigt wurde. Duratec Base Primer wurde von DLBA Robotics angebracht und zu einer 150-gekörnten Endschicht gesandstrahlt, und dann wurde das Profil zu Pearson Composite (Warren, R.I.) gebracht, wo die beiden letzten Duratec-Phasen (EZ-Sandstrahlgrundierung und letzte Endschicht) aufgetragen wurden und die Endbehandlung wie in Schritt 3 beschrieben fertiggestellt wurde.

Dann zog Pearson die Hauptgehäuseformen von dem Profil. Es wurde eine Werkzeuggelschicht aufgetragen, gefolgt von Gelegesichten, bis die gewünschte Laminatdicke erreicht wurde. Trennlinien für die multiplen Formen wurden auf der Grundlage von Produktionsanforderungen festgelegt, wie z.B. dem Entformen und der Einfachheit der Handhabung der Formen. In einigen Fällen wurden die Trennlinien so platziert, dass sie weniger sichtbar sind (z.B. die Trennlinie im Fenstergürtel, gezeigt in Schritt 2). Gehäuseformen bestanden aus per Hand verlegten Formschalen, die von Wabenstrukturen gestützt wurden. Rollen und Hebeösen wurden zu den Werkzeugen hinzugefügt, um die Mobilität während der Serienfertigung zu erleichtern. In Schritt 5 ist eine typische Form dargestellt.

Da DLBA Robotics und andere erfahrene Marktteilnehmer in der Composite-Branche in einem frühen Stadium des Projekts mit einbezogen wurden, waren Proterra und seine Werkzeuglieferanten typischerweise in der Lage, Schnittstellenaufgaben wie den Export der Oberflächengeometrie mit nur minimalen Problemen zu meistern. Jeder Lieferant brachte wichtige Vorschläge ein, die die Herstellung der Werkzeuge und der Composite-Bauteile verbesserten. Allerdings konnten aufgrund des engen Zeitplans für das CTE-Projekt, obwohl bei jedem Schritt der Werkzeugfertigung nur minimale Schwierigkeiten auftauchten, nur die wichtigsten Komponenten des Busgehäuses den oben beschriebenen ersten Schritt der Werkzeugfertigung durchlaufen. Die Werkzeuge für viele sekundäre Oberflächen, wie Dachverkleidungen, Armaturenteile, zusammen mit verschiedenen Platten und Abdeckungen, wurden gemeinsam von den Mitarbeitern von Proterra und von C.F. Maier Composites Inc. (Golden, Colo.) per Hand gefertigt, und dann wurden diese Teile in dem Werk von C.F. Maier hergestellt. Custom Composite Technologies (Bath, Maine) fertigte die Formen für die Innenböden. Es werden getrennte innere Bodenteile benötigt, um eine kontrollierte „A“-Oberfläche zu liefern, die dafür geeignet ist, Bodengummi zu befestigen und dabei gleichzeitig eine zufriedenstellende Innengestaltung des Passagierabteils zu garantieren. Die Werkzeugkosten in Dollar für die Buskomponenten stiegen letztlich bis in die Hunderttausende.

Auflagen & Montage

Die Baugruppen des Busgehäuses und der Innenböden werden von C & C Fiberglass Components Inc. (Bristol, R.I.) geformt, deren Team schnell die ersten Prototypen der Composite-Gehäuseschalen und Bodenabschnitte der Innengänge produzierte. Die Busgehäuseschale ist in zwei Teilen mittels Vakuumunterstütztem Harztransferspritzen (VARTM) gefertigt. Die Formen werden vorbereitet und mit Gel beschichtet, eine erste Mattschicht wird aufgetragen, um die harzreiche Hülle am Teil zu befestigen, und dann werden Armierungen aus vernähtem Gelege, Kernmaterialien und zusätzliche Armierungen der Innenhülle in jedem Werkzeug aufgelegt. Die Teile werden Vakuum-ingesackt und eingegossen, wodurch gehärtete obere und untere Schalenkomponenten mit einer Dicke der fertigen Wand von etwa 2,5 cm entstehen. Die Teile werden entformt und nachgeschnitten, und das Ober- und das Unterteil des Busses werden zusammengefügt. Der letzte Schritt ist die Auftragung eines Grundierungs- und Anstrichsystems auf Epoxidbasis, das durch eine beliebige vom Kunden gewünschte künstlerische Busgestaltung – typischerweise vordekorierte, druckempfindliche Klebefolien - ergänzt werden kann.

Enthüllen & Testen

Proterras *EcoRide* BE35-Bus hat bereits begonnen, sich in der Öffentlichkeit zu zeigen. Im Februar wurde er in San Jose enthüllt und legte Stops in Los Angeles, Sacramento und San Francisco ein. Gleichzeitig testet Proterra EcoRides Betriebleistungen in Feldversuchen an verschiedenen Orten. Obwohl die Versuche noch andauern, kann man jetzt schon sagen, dass das Composite-Busgehäuse seinen wichtigsten Test bestanden hat : Es hat sein Zielgewicht von 1.905 kg fast eingehalten. Der fertige Bus ist somit um 3.175 kg *leichter* als sein nächster Wettbewerber im Markt für brennstoffzellengetriebene Busse. Die Erreichung dieses Gewichts zu vertretbaren Kosten war entscheidend für die Herstellung eines Verkehrsproduktes, das eine saubere, energieeffiziente, städtische Beförderung mit Hilfe von Brennstoffzellen und der modernsten Batterietechnologie in einer fortschrittlichen Serienkonfiguration mit Hybridstromantrieb gewährleisten kann.

Im März fuhr der Bus zur Teststrecke der Busforschungs- und Testeinrichtung in Altoona, Pa., die für

vorgeschriebene Tests von neuen Busdesigns genutzt wird, um zu überprüfen, ob sie den Vorschriften über Brennstoffeffizienz der amerikanischen Verkehrsbehörde entsprechen. Diese Tests, die mit beladenem Bus durchgeführt wurden, um die vorgegebene Passagierlast zu simulieren, und auf den „Dienstzyklen für Linienbussen“ basieren, die in den *Standardrichtlinien für die Beschaffung von Bussen für Dieselbusse mit 30- und 40-Fuß-Bodenhöhe* der APTA vorgegeben sind, simulieren den Busbetrieb unter realen Bedingungen. Der Vergleich mit typischen Einsparungen von Diesel-betriebenen Bussen hängt von dem gewählten Dienstzyklus ab und wird weiter erschwert durch die Tatsache, dass der EcoRide BE35 sowohl in einem Wasserstoff-Brennstoffzellenmodus mit erhöhter Reichweite als auch in einem elektrischen Modus nur mit Batterie und einer geringeren Reichweite betrieben werden kann. Die Tests haben die Prognosen über den Energieverbrauch bestätigt, die während des Designs aufgestellt wurden und zeigten Verbesserungen bei den Brennstoffeinsparungen von 400 Prozent im Vergleich mit konventionellen Dieselbussen. [CT]

Verfasser des Beitrags

John Winkel ist Cheffingenieur in seiner
Beratungsfirma MountainSpire (Thornton, Colo.)
jwinkel@indra.net

