

Multimaterialkonzept für ein Elektrofahrzeug

AUTOREN



Dr.-Ing. Jens Meschke

ist Leiter der Unterabteilung Leichtbau und Strukturoptimierung in der Fahrzeugtechnik der Volkswagen-Konzernforschung in Wolfsburg.



Dr.-Ing. Jörn Tölle

ist Leiter des Teams Hybrid Systems in der Forschung und Entwicklung bei der Benteler Automobiltechnik GmbH in Paderborn.



Dipl.-Ing. Lutz Berger

ist Teamleiter Simulation passive Sicherheit im Geschäftsbereich Karosserie der fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH in Aachen.

Batterieelektrische Fahrzeuge erfordern infolge großer und schwerer Energiespeicher und des elektromotorischen Antriebs andere Karosseriekonzepte als die für Verbrennungsmotoren bekannten Bauweisen. Leichtbau und Crashesicherheit sind auch dabei wesentliche Zielkriterien. Für die Umsetzung eines derartigen Karosseriekonzepts verfolgte das Forschungsprojekt Alive unter Koordination der Volkswagen-Konzernforschung die Strategie eines anforderungs- und lastpfadgerechten Werkstoffeinsatzes.

WIRTSCHAFTLICH UMSETZBARER LEICHTBAU

Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojekts Alive (Advanced High Volume Affordable Lightweighting for Future Electric Vehicles) wurde ein Konzept für ein batterieelektrisches Fahrzeug entwickelt und aufgebaut. Priorisierte Zielsetzung des Projekts waren die Gewichtsreduzierungen der Rohkarosserie, Türen, Klappen, Fahr-

werkcomponenten und Interieur-Komponenten (Sitze) von 30 bis 40 % sowie die wirtschaftliche Umsetzbarkeit der entstandenen Konzepte in einer Großserienfertigung. Zur Realisierung dieser Ziele wurden verschiedene Leichtbauwerkstoffe und Simulationsverfahren auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) weiterentwickelt, Werkstoffkennwerte aufgenommen sowie Füge-technikmodelle erstellt. Parallel dazu wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Eine beson-

dere Herausforderung in diesem Projekt bestand im Aufbau von drei Demonstrator-Karosserien, um die in den Crashsimulationen erzielten Ergebnisse an realen Fahrzeugcrashtests zu validieren. Im Alive-Projekt wurde je ein Front-, ein Pfahl- und ein Heckcrash durchgeführt.

Das Projekt wurde von 23 europäischen Partnern, darunter sieben OEMs, sieben Zulieferer sowie fünf Forschungseinrichtungen, von Oktober 2012 bis September 2016 bearbeitet.

Alive war Teil des Seam-Clusters, einem Zusammenschluss mehrerer EU-Projekte, die das übergeordnete Ziel verfolgten, fortschrittliche Fahrzeugstrukturen und moderne Werkstoffe für zukünftige Fahrzeuggenerationen, insbesondere von Elektrofahrzeugen, zu entwickeln. Die Projekte des Seam-Clusters bauen unter anderem auf den bereits erfolgreich abgeschlossenen Projekten Elva [1], SuperLight-Car [2] und SmartBatt [3] auf.

KAROSSERIEKONZEPT

Die genannten Gewichtsziele sind sehr ambitioniert. Daher wurden zu ihrer Realisierung diverse Multimaterialkonzepte zusammengestellt und bilanziert. Im Ergebnis entstand ein Karosseriekonzept unter Einsatz einer Kombination von unterschiedlichen Aluminiumlegierungen, höchstfesten Stählen und Faserverbundwerkstoffen, **BILD 1**. Die Hauptlastpfade wurden über hochfeste Aluminium-Extrusionsprofile sowie hochfeste Stähle mit Festigkeiten bis zu 1800 MPa ausgeführt. Der Gewichtsanteil der Aluminiumlegierungen an der Rohkarosserie

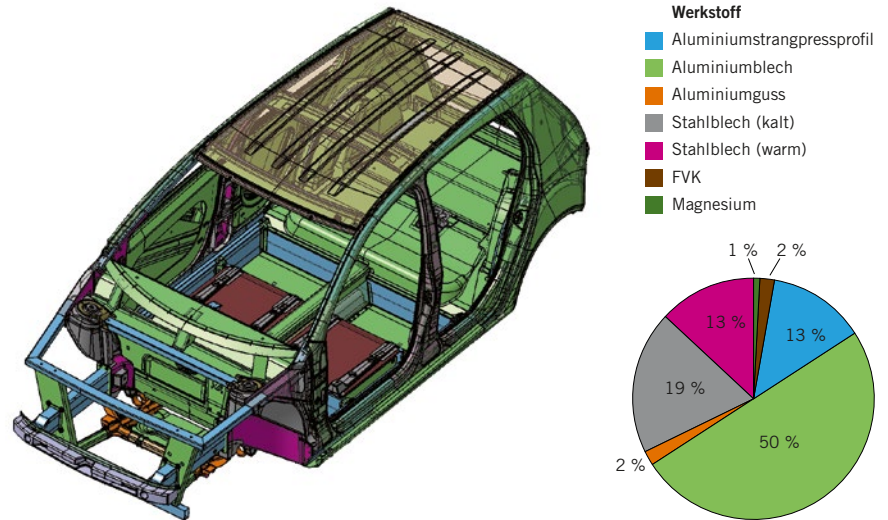


BILD 1 Darstellung der Werkstoffverteilung des Alive-Karosseriekonzepts (© Alive)

beträgt etwa 65 %. Das Dach sowie die Heckklappe bestehen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) und metallischen Verstärkungselementen. Die Integration des Batteriekastens in die Karosserie mit dem dazugehörigen Verschaltungskonzept der Batteriemodule war ein weiterer Schwerpunkt der Entwicklung. Für die Türen wurden Leichtbaukonzepte auf Basis verschiedener im Automobilbau relevanter Aluminiumlegierungsgruppen (5000er, 6000er und 7000er) entwickelt, die eine Massenreduktion von 44 % im Vergleich zum Stand der Technik ermöglichten. Besondere Herausforderungen ergaben sich bei der Gestaltung der Lastableitung im Fall eines Frontcrashes. Diese Ableitung erfolgt mit einem deformierbaren Aluminiummotorträger über die nahezu

starrten Längsträger aus Stahl mit einer Festigkeit von 1800 MPa nach außen in die Aluminiumschweller. Auch dem Design der Seitenstruktur, die eine Beschädigung der Batterie im Seiten-crash verhindert, musste besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

FÜGETECHNIK

Die fügetechnische Planung im Alive-Projekt fokussierte sich auf eine großserientaugliche Umsetzbarkeit des Konzepts mit möglichst wenigen und kostengünstigen Fügeverfahren. Dies ist insbesondere im Bereich der Werkstoffmischbau-Verbindungen eine anspruchsvolle Aufgabenstellung. In einem ersten Schritt wurden unter Berücksichtigung des Werkstoff-

Werkstoffkombination		Priorisiertes Fügeverfahren	
1. Werkstoff	2. Werkstoff	1. Priorität	Alternative
Aluminiumblech	Aluminiumblech	Widerstandspunktschweißen	Lichtbogenschweißen
Aluminiumblech	Aluminiumstrangpressprofil	Lichtbogenschweißen	Fließformschrauben
Aluminiumblech	Kaltumformstahl	Widerstandselementschweißen + Kleben	Vorgelochtes Fließformschrauben + Kleben
Aluminiumblech	Pressgehärteter Stahl	Widerstandselementschweißen + Kleben	–
Aluminiumstrangpressprofil	Aluminiumstrangpressprofil	Lichtbogenschweißen	Fließformschrauben
Pressgehärteter Stahl	Aluminiumblech	Widerstandselementschweißen + Kleben	Vorgelochtes Fließformschrauben + Kleben
Pressgehärteter Stahl	Aluminiumstrangpressprofil	Vorgelochtes Fließformschrauben + Kleben	Widerstandselementschweißen + Kleben
Pressgehärteter Stahl	Kaltumformstahl	Widerstandspunktschweißen	Lichtbogenschweißen
Pressgehärteter Stahl	Pressgehärteter Stahl	Widerstandspunktschweißen	Lichtbogenschweißen
Kaltumformstahl	Aluminiumstrangpressprofil	Widerstandselementschweißen + Kleben	Fließformschrauben + Kleben
Faserverbundkunststoff	Aluminiumstrangpressprofil	Kleben	Verschrauben
Faserverbundkunststoff	Kaltumformstahl	Umspritzen	Verschrauben

TABELLE 1 Fügetechnikauswahl für verschiedene Werkstoffkombinationen (© Alive)

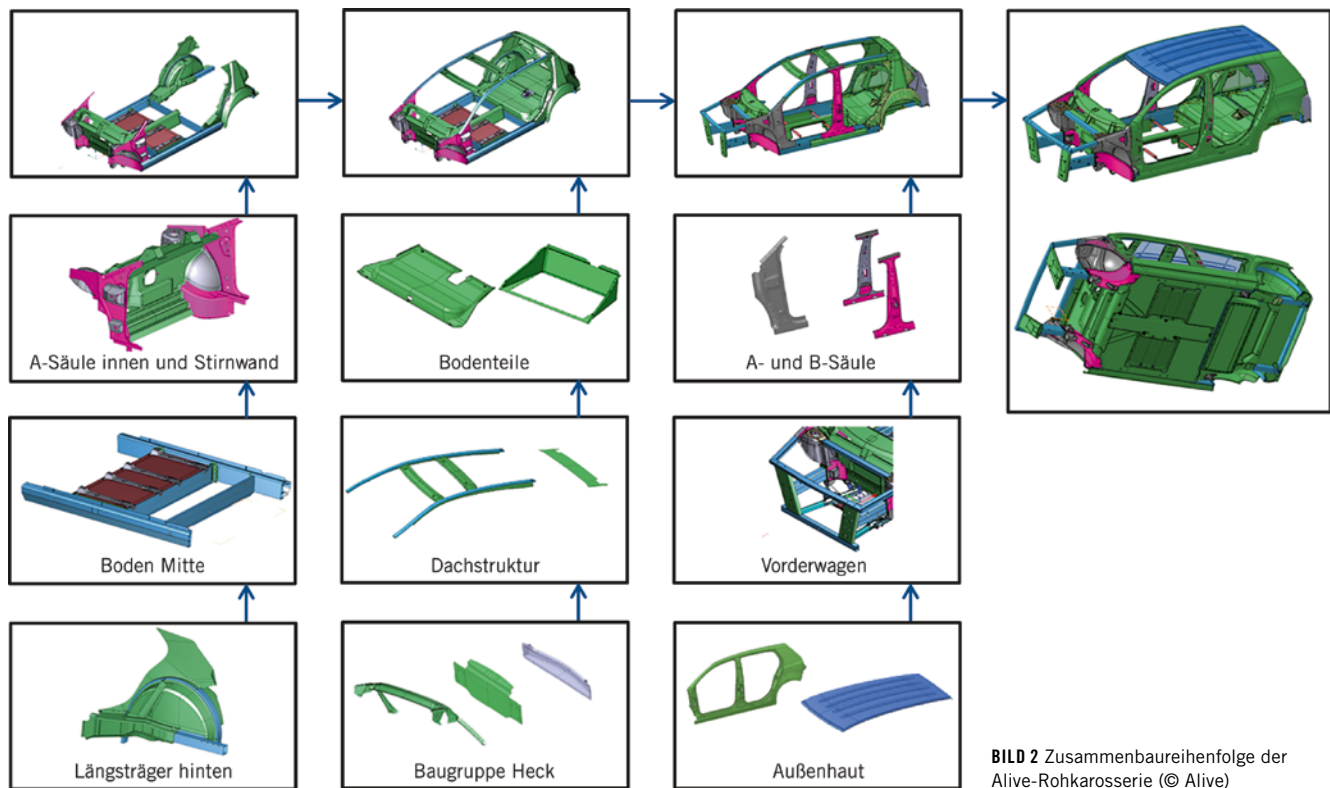


BILD 2 Zusammenbaureihenfolge der Alive-Rohkarosserie (© Alive)

konzepts mehrere Füge-techniken für jede Kombinationsmöglichkeit untersucht. Dabei wurden für das Karosseriekonzept ein priorisiertes Verfahren mit Blick auf eine Seriumsetzbarkeit, ein alternatives Verfahren sowie auch ein prototypisches Verfahren inklusive der jeweils notwendigen Randbedingungen und Prozessgrenzen definiert. **TABELLE 1** zeigt beispielhaft eine Auswahl an Füge-techniken für verschiedene Werkstoffkombinationen.

Aufbauend auf dem Karosseriekonzept und den fūgetechnischen Vorarbeiten wurde begleitend zum Fahrzeugdesignprozess eine fūgetechnische Planung durchgefūhrt. Die Zusammenbaureihenfolge wurde maßgeblich durch die gewählte Konstruktionslösung im Bereich der A-Säule und der Stirnwand bestimmt. Eine Herausforderung stellten die Verbindungen zwischen der Aluminiumstirnwand und dem Warmformstahl der A-Säule bezüglich der Zugänglichkeit dar. Aus diesem Grund startet der Zusammenbau im Bereich des Vorderwagens mit der Stirnwand und der inneren A-Säule. Diese Baugruppe wird anschließend mit dem zentralen Boden und mit den hinteren Längsträgern verbunden. Im weiteren Schritt wird die Karosserie durch die Bodenbauteile, den Rahmen im Fahrzeug-

heck und den Dachrahmen geschlossen. Anschließend werden die äußeren Strukturbauteile B-Säule und Vorderwagen hinzugefügt und abschließend die Außenhautbauteile gefūgt. **BILD 2** zeigt schematisiert die Zusammenbaureihenfolge der Alive-Karosserie.

Von Beginn an wurden erweiterte Simulationsmethoden erarbeitet, um eine höhere Vorhersagegenauigkeit bei der Berechnung der Karosseriesteifigkeit, Crash- und Betriebsfestigkeit zu erreichen. Aus diesem Grund wurde die Charakterisierung der Verbindungen mit besonderer Aufmerksamkeit verfolgt. Dazu wurden Verbindungstechniken ausgewählt, die in den Bereichen hoher Belastungen liegen. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden von den Partnern Renault, Volkswagen und Benteler Verbindungsproben für die Fūgetechniken Fließformschrauben, Aluminiumpunktschweißen, MIG-Schweißen, Widerstandselementschweißen und Strukturkleben hergestellt. Dazu mussten zunächst die jeweiligen Prozessparameter definiert werden, um Versuche zur Charakterisierung der Steifigkeit, der Schwingfestigkeit und der Crashfestigkeit durchfūhren zu können. Bei der Charakterisierung waren die Partner der KU Leuven, das

Fraunhofer LBF Darmstadt und Renault beteiligt. Beispielhaft zeigt **BILD 3** die Kraftverformungsverläufe verschiedener Fūgetechniken unter Zugscherbelastung. Ergänzend wurde das Versagensverhalten analysiert. Diese Ergebnisse bildeten die Basis zur Beurteilung der Eignung der Verfahren für hochbelastete Zonen und wurden als Eingangsdaten für den Aufbau der Ersatzmodelle für die Simulation verwendet.

Durch die Erstellung von virtuellen Verbindungsersatzmodellen für die FEM und deren Daten wurde die Strukturoptimierung der Fahrzeugkarosserie bezüglich der Verbindungen unterstützt. Diese Arbeiten wurden hauptsächlich durch die Partner Renault und Volvo mit jeweils zwei verschiedenen Arten von Ersatzmodellierungen (Volumenelement und Kohäsivzonenelement) durchgefūhrt.

Eine besondere Aufmerksamkeit erforderten die Mischbauverbindungen im Bereich der Hauptlastpfade. Dort sind die Anbindungen des vorderen Längsträgers aus phs-ultraform 1800 an den Aluminiumschweller sowie auch die Anbindung der B-Säule aus dem gleichen Stahlwerkstoff an den Sweller und den Aluminium-

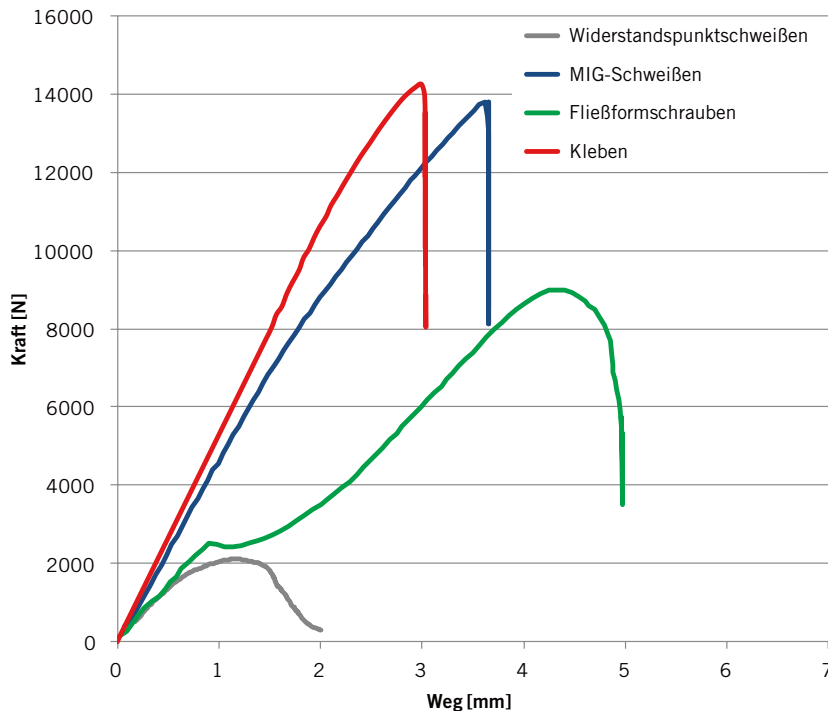


BILD 3 Vergleich der Kraftverformungskurven für verschiedene Verbindungsarten im Zugscherversuch (© Alive)

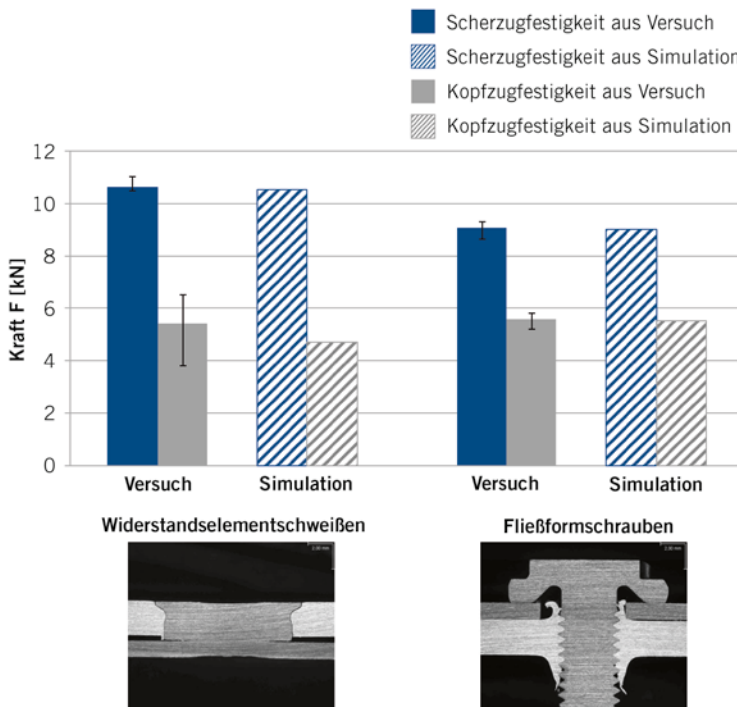


BILD 4 Vergleich der Festigkeiten in Versuch und Simulation für die Werkstoffkombination phs-ultraform 1800 mit EN AW6082-T6 (© Benteler)

dachlängsträger zu nennen. Für diese Bereiche wurden die Verfahren Fließformschrauben für Verbindungen mit einseitiger Zugänglichkeit und Widerstandselementschweißen für Verbindungen

mit zweiseitiger Zugänglichkeit jeweils in Kombination mit Strukturklebstoff priorisiert. Beide Verfahren zeichnen sich durch hohe Festigkeitskennwerte und hohe Wirtschaftlichkeit aus.

Eine Gegenüberstellung der Maximalfestigkeiten unter Schub- und Normalbelastung aus Versuchen und den Probensimulationen für die beiden Verbindungsarten zur Realisierung von Mischbaukombinationen zeigt **BILD 4**.

Insgesamt konnte auf Probenebene eine sehr gute Übereinstimmung des Kraft-Deformationsverhaltens zwischen Versuch und Simulation erreicht werden. Diese Modelle konnten anschließend für die Lastpfadoptimierung und die Anpassung der Konstruktionen der Verbindungsbereiche genutzt werden. Im Rahmen des Alive-Projekts wurden diese Arbeiten nicht nur für die erläuterten Verfahren Fließformschrauben, Widerstandselementschweißen und das Kleben, sondern auch für das Widerstandspunktschweißen und das Lichtbogenschweißen von Aluminium erfolgreich durchgeführt.

Ergänzend zur Adaption bestehender Verbindungstechniken an das Karosseriekonzept wurden im Rahmen des Alive-Projekts Neuentwicklungen vorgenommen. Zum einen wurde ein Verfahren zum punktförmigen Verbinden von verzinktem Kaltformstahlblech mit Aluminium [4] und zum anderen ein Verfahren zum gießtechnischen Fügen von verschiedenen Werkstoffen im Fahrwerkbereich entwickelt [5]. Auf die Darstellung dieser Neuentwicklungen wird im Rahmen dieser Veröffentlichung jedoch verzichtet.

ABGLEICH DER SIMULATIONEN AUF GESAMTFAHRZEUGEBENE

Um die simulativ ausgelegten Konzepte zu überprüfen, wurden im Rahmen des Projekts drei Demonstrator-Karosserien aufgebaut und anschließend durch die fka für ausgewählte Lastfälle Versuche durchgeführt.

Einer der ausgewählten Lastfälle ist der Pfahlaufprall, der in Anlehnung an das Euro-NCAP-Protokoll namens Oblique Pole Side Impact Test Protocol v7.0.2 durchgeführt wurde. Bei diesem Test trifft das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 32 km/h und einem Winkel von 75° in einer fest definierten Position auf einen starren Pfahl auf. Im Rahmen des im Alive-Projekt durchgeführten Versuchs wurde die Verzögerung des Fahrzeugs gemessen und das Verhalten durch Hochgeschwindigkeitskameras aus drei Perspektiven aufgezeichnet. Ebenfalls

ATZ live

Reibungs- minimierung im Antriebsstrang



Systemverständnis eröffnet zukünftige Wege

6. ATZ-Fachtagung Tribologie
21. und 22. November 2017
Esslingen am Neckar

AKTUELLES TAGUNGSPROGRAMM
www.ATZlive.de

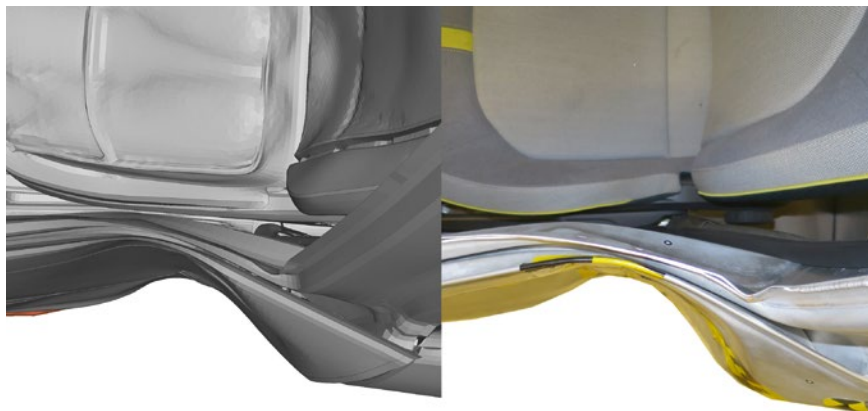


BILD 5 Deformationsvergleich der Simulation (links) mit dem Versuch (rechts) beim Seitenfahlaufprall, Draufsicht Tür (© Alive)

wurde ein Laserscanner eingesetzt, um die Deformation nach dem Versuch zu messen. Diese Versuchsergebnisse wurden anschließend den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Es zeigte sich eine grundsätzlich gute Übereinstimmung des globalen Verhaltens. Auch die Intrusionswerte und die gemessenen Beschleunigungen entsprechen denen aus dem Versuch und belegen die Aussagen der Simulation.

Ebenfalls entspricht das Bruchverhalten der Komponenten im Versuch weitestgehend denen aus der Simulation. Dieses wurde in der Simulation jedoch nicht detailliert berücksichtigt. In **BILD 5** ist beispielhaft ein visueller Vergleich des Aufprallbereichs dargestellt. Die auftretenden Deformationen im Versuch entsprechen denen aus der Simulation. Die gesetzten Zielwerte hinsichtlich Restsitzbreite und Schutz der Antriebsbatterie vor Deformation wurden durch die Versuchsergebnisse bestätigt.

Die anderen im Alive-Projekt durchgeführten Gesamtfahrzeugversuche zeichnen ein ähnliches Bild, sodass die virtuell ausgelegten Leichtbaukonzepte hinsichtlich der Crashesicherheit durch die Versuche bestätigt werden konnten.

Insgesamt zeigte sich in der Entwicklung des Karosseriekonzepts ein erheblicher Einfluss des Versagens von Fügeverbindungen auf die Crashesicherheit. Aus diesem Grund wurden die Zug- und Scherkräfte an kritischen Stellen bewertet und hinsichtlich der aus den Komponentenversuchen ermittelten Grenzen ausgelegt. Abschließend wurden die im Konsortium gesetzten Ziele anhand von Gesamtfahrzeugversuchen überprüft. In

der Realität und in der Simulation zeigt sich die Füge-technik als ein Schlüssel für den Erfolg eines Leichtbaukonzepts in Mischbauweise, das Ziele hinsichtlich Sicherheit und Kosten erfüllen muss.

LITERATURHINWEISE

- [1] RWTH Aachen University: Elva – Advanced Electric Vehicle Architectures. Online: www.elva-project.eu, aufgerufen am 18.08.2017
- [2] SLC – Superlight-Car-Projekt, Innovative Development for Lightweight Vehicle Structure. International Conference Super Light Car, Wolfsburg, 2009
- [3] AIT Austrian Institute of Technology GmbH: SmartBatt – Smart and Safe Integration of Batteries in Electric Vehicles. Online: www.smartbatt.eu, aufgerufen am 18.08.2017
- [4] Pothast, S.; Tölle, J.: Möglichkeiten zur Realisierung thermisch gefügter Stahl-Aluminium-Verbindungen. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, 28.-29.03.2017
- [5] Reimann, T.; Albrecht, P.; Kleinhans, R.: Verbundbauteil und Verfahren zur Herstellung eines Verbundbauteils. Patent DE102005119396A1

DANKE

Der Dank der Autoren gilt allen Projektpartnern für die Zusammenarbeit im Rahmen von Alive. Die Forschungsaktivitäten, die zu diesen Ergebnissen führten, erhielten Fördermittel aus dem siebten Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union, Grant Agreement Nr. 314234 (Alive).



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.atz-worldwide.com

INTEGRIERTE ELEKTRISCHE ACHSEN FÜR LKW UND BUSSE

Lokale Luftverschmutzung, wachsende Sensibilität gegenüber Geräuschemissionen, die Notwendigkeit zur globalen Reduktion von CO₂-Emissionen sowie steigender politischer Druck erhöhen den Bedarf an emissionsfreien Transportlösungen vor allem in städtischen Ballungsräumen. OEMs entwickeln deshalb bereits an der nächsten Generation von elektrischen Bussen und LKWs, die neben dem emissionsfreien Transport vor allem auch wirtschaftlich attraktiv sind - sowohl für den Fahrzeugbetreiber, als auch für den Hersteller.

In der Vergangenheit wurden vorwiegend bestehende Komponenten zu elektrischen Nutzfahrzeugen integriert, mit dem Ziel, die Änderungen gegenüber dem konventionellen Antriebsstrang möglichst gering zu halten. Um dem künftig zu erwartenden, stark zunehmenden Marktanteil von elektrischen LKWs und Bussen Rechnung zu tragen, arbeiten OEMs und Zulieferer an neuen Produktentwicklungen. Hauptziele dieser Entwicklungen sind dabei geringere Baugrößen, Produktkosten und geringeres Systemgewicht, sowie die Steigerung der Systemeffizienz, Zuverlässigkeit und der Dauerhaltbarkeit.

DER ELEKTRISCHE ANTRIEB

Eine Hauptbaugruppe eines elektrischen Nutzfahrzeuges ist der elektrische Antrieb, der somit im Fokus der Optimierungen steht. AVL entwickelt individuell optimierte elektrische Antriebe für leichte bis schwere LKW und Busse. Es werden dabei unterschiedliche Antriebskonzepte umgesetzt – jeweils angepasst an die gegebenen Projektanforderungen und die Applikation. Überdies werden auch

modulare und skalierbare Familienkonzepte, unter Berücksichtigung der Fahrzeuganforderungen und der verfügbaren Bauräume entwickelt. Ein Vorteil dieser Familienkonzepte ist die Minimierung sowohl von Entwicklungs- als auch Produktkosten. Durch den Einsatz modellgestützter Auslegungstools werden alle relevanten Systemparameter bereits in der frühen Entwicklungsphase analysiert und optimiert. Dies ermöglicht einerseits die Auswahl und Integration der geeignetsten Komponenten und sichert



andererseits eine optimierte Systemintegration mit bester Performance und geringsten NVH- und EMV-Emissionen. Um die Anforderungen ans elektrische System und somit die Systemkosten der e-Achse gering zu halten, entwickelt AVL hochdrehende Elektromotoren, die je nach Fahrzeuganforderung über teils mehrstufige Getriebe gekoppelt werden. In internen Forschungs- und Entwicklungsprogrammen wurden Lösungen für die damit verbundenen Herausforderungen im Bereich der Lagerungen, Dichtungen, Verzahnungen und Schmierung erarbeitet.

Entscheidend für effiziente e-Motoren in der Nutzfahrzeuganwendung ist eine optimierte Kühlung. Die von AVL entwickelte und bewährte direkte Kühlung der Statorwicklungen ermöglicht höchste

kontinuierliche Leistungen bei gleichzeitig kleinster Baugröße des Elektromotors. Eine weitere Möglichkeit, die Komponentenkosten zu verringern.

Abhängig von den jeweiligen Projektanforderungen bietet AVL verschiedene Lösungen für Stand-alone, teilintegrierte und vollintegrierte Leistungselektroniken an. Bei Bedarf entwickelt AVL individuell optimierte Komponenten für e-Motor, Leistungselektronik, Getriebe und Steuerung bis zur Serienreife und stellt die Industrialisierung mit etablierten

Partnern sicher. Durch den Einsatz von innovativen Kühlkonzepten wird sichergestellt, dass Motor, Leistungselektronik und Getriebe mit optimalen Kühlmittelströmen versorgt werden, um somit sowohl die Effizienz als auch die Dauerhaltbarkeit des gesamten elektrischen Antriebs zu optimieren.

Nicht zuletzt führt eine geringe Anzahl an Schnittstellen zum Fahrzeug zu größerer Zuverlässigkeit der elektrischen Nutzfahrzeugachsen. Außerdem wird so der Montageaufwand im Fahrzeug auf ein Minimum reduziert.

Die nötige Steuerungssoftware sowohl für die einzelnen Komponenten als auch für die gesamte elektrische Achse wird bei AVL modellbasiert entwickelt und auf Hardware-in-the-Loop-Systemen kalibriert. Mit den vorhandenen Prüfständen können bei AVL sowohl alle nötigen Einzelkomponenten als auch gesamte Achssysteme für leichte bis schwere Nutzfahrzeuge validiert werden.

Das Familienkonzept der e-Achse für Nutzfahrzeuge ist eine valide Lösung, um den Anforderungen an emissionsfreien, städtischen Personen- und Gütertransport zu begegnen. □