



Neue Materialien und Techniken setzen dem Design keine Grenzen – erste Design-Entwürfe des Mute-Elektrofahrzeugs der TU München.

Neue Grenzen, neue Freiheiten

Ein Elektroauto ist nicht einfach nur ein weiteres Auto: Dem absoluten Zwang zum Leichtbau stehen neue Freiheiten gegenüber. Die kompakte Antriebseinheit lässt Raum für neue Gestaltungen, neue Materialien eröffnen neue Chancen.

An der Technischen Universität München entwickeln 20 Lehrstühle des Wissenschaftszentrums „Elektromobilität“ ein gezielt auf die Anforderungen der Elektromobilität zugeschnittenes Fahrzeug. Im Mittelpunkt steht der Mensch, beim Lehrstuhl für Ergonomie repräsentiert durch das virtuelle Menschmodell „Ramsis“, denn Klein und Groß, Jung und Alt sollen sich schließlich wohlfühlen in ihrem Auto. Die äußere Form soll dem zukunftsweisenden Fahrzeugkonzept gerecht werden: aerodynamisch, ästhetisch und trotzdem bequem. Und unter der Außenhaut löst innovativer Leichtbau die Forderungen nach niedrigem Gewicht und hoher Sicherheit.

Die derzeitigen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren zeichnet sich aus durch hohe Reichweite, hohe Leistung –

und hohes Gewicht. Heutige Elektro- und Hybridfahrzeuge sind aufgrund ihres großen Batterieblocks meist sogar schwerer als ihre benzin- oder dieselpetriebenen Pendanten. Zudem sind Lithium-Ionen-Akkus zurzeit noch sehr teuer. Der Entwicklungstrend geht daher zu kleineren Elektrofahrzeugen, die für die Mobilität im urbanen Raum mit einer Reichweite von etwa 100 km entwickelt werden.

Bei diesen Fahrzeugen wird ein Gesamtfahrzeuggewicht von knapp 500 kg angestrebt, wovon die Primärbatterie nur etwa 100 kg ausmacht. Solche Fahrzeuge dürfen in der günstigen Klasse L7E (Fahrzeuggewicht unter 400 kg) zugelassen werden und erzielen damit einen erheblichen Kostenvorteil. Der tragende Rahmen ist hier neben den Batterien die schwerste Komponente des Fahrzeugs. Absolut

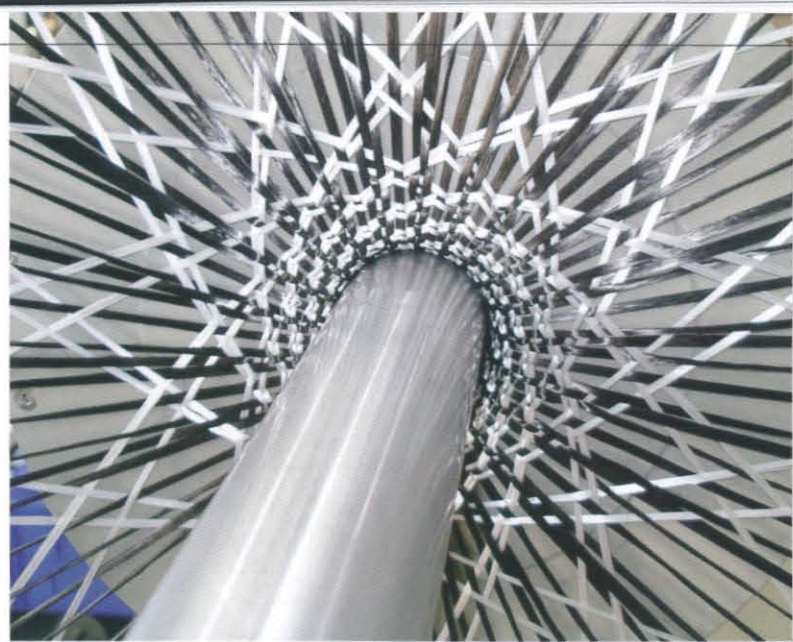


gesehen weist er das größte Masseinsparpotenzial auf.

Die am Lehrstuhl für Leichtbau (LLB) der TU München praktizierte computergestützte Designoptimierung spart durch umfangreiche Simulationen erhebliche Entwicklungskosten. Bei der strukturmechanischen Auslegung wird dabei zunächst auf Standardprofile aus Metall zurückgegriffen. Lokale Steifigkeitsdefizite der tragenden Rahmenstruktur werden durch eine Verstärkung einzelner Komponenten beispielsweise durch kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK) ausgeglichen. Faserverbundwerkstoffe (FVW) werden zudem in Bereichen der tragenden Struktur eingesetzt, die eindeutige Lastpfade aufweisen. Gerade bei großflächigen, ebenen oder leicht gekrümmten Bauteilen der Karosserie, also im Dach- oder Bodenbereich, weisen sie ein hohes Potenzial auf. Hier besteht die

Möglichkeit, durch eine belastungsgerechte Orientierung von Faserwinkeln der Laminat-Einzelschichten gezielt Einfluss auf die Torsions- bzw. Biegesteifigkeit des Bauteils zu nehmen. Gleichzeitig wird durch die geringe Dichte (1,7 g/cm³ bei CFK) dieser Werkstoffe der Schwerpunkt des Elektroautos zugunsten der Fahreigenschaften nach unten verlegt.

Herkömmliche Materialien wie Stahl und Aluminium sind mit



Mit der Umflechttechnik werden bereits erste leichte und extrem stabile Faserverbundhohlbauteile in Serie hergestellt – Flechtwerk für faserverstärkte Verbundmaterialien.

ihrem Leichtbaupotenzial in einem Stadium angekommen, das keine großen Verbesserungen mehr zulässt. Ein großes Potenzial bietet dagegen der umfassende Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in Struktur-, Interieur- und Außenhautbauteilen.

Zwar scheidet der Einsatz von Faserverbundbauteilen gegenüber Metallbauweisen derzeit noch an den zu hohen Herstellungskosten, doch mit einer voll automatisierten Herstellungskette sind die erforderlichen Taktzeiten von etwa zwei Minuten pro Bauteil zu erreichen.

In den letzten Jahren wurde anhand einiger Bauteile für die Anwendung in Kleinserie das Potenzial der Faserverbundwerkstoffe in Strukturbauteilen nachgewiesen. Wichtige Forschungsthemen für eine weitere Industrialisierung sind verschnittarme oder sogar verschnittfreie Fertigung, kürzere Taktzeiten, Handling von Halbzeugen und Preformen, Funktionsintegration, Struktur-, Crash- und Fertigungssimulation sowie das Recycling von Fasern, Harz und Bauteilen.

Der Lehrstuhl für Carbon Composites der TU München (LCC) entwickelt derzeit mehrere neue Herstellungstechnologien für Faserverbundbauteile, die diese Forderungen erfüllen.

Beim Preform-RTM-Prozess werden trockene Fasern oder Halbzeuge mit meist textilen Verfahren in eine sogenannte Vorform gebracht, die schon die Endkontur des Bauteils darstellt. Im nachfolgenden Arbeitsschritt wird diese

Das Ziel, ein möglichst geringes Gewicht, wird erreicht durch das Zusammenspiel von großflächigen Leichtbauteilen und einem stabilen Metallrahmen.



Die Anzeige von sekundären Informationen wird idealerweise auf einem Display zusammengefasst.

dann mit Harz infiltriert. Ein Preform-Verfahren, das am LCC näher untersucht wird, ist die Verarbeitung von flächigen Halbzeugen wie Geweben oder Gelegen. Diese werden zugeschnitten und umgeformt (drapiert). Ein meist thermoplastischer Binder, der die einzelnen Zuschnitte miteinander verbindet, sichert den Zusammenhalt der Preform. Eingesetzt wird das Verfahren derzeit bei BMW für die Dächer des M3 und M6 und beim Roding, ein Roadster, dessen Monocoque aus CFK aufgebaut ist.

Ein anderes Preform-Verfahren mit sehr hohem Automatisierungspotenzial ist die Umflechtechnik zur Herstellung von Faserverbundhohlbauteilen. Dabei wird ein formgebender Kern durch den Mittelpunkt einer Flechtmaschine geführt, die mit Verstärkungsfasern, beispielsweise Kohlenstofffasern, besetzt ist. Der entstehende Flechtschlauch legt sich eng auf dem Kern ab. Auch hier wird die Matrix im nachfolgenden Injektionsschritt eingebracht und ausgehärtet. Ein Fahrzeugbauteil, welches bereits so in Serie gefertigt wird, ist der Stoßfängerträger des BMW M6. Aber auch andere Profile in Fahrzeugen sind mit dieser Technik kostengünstig herzustellen. Unter anderem wird die A-Säule des CFK-Supersportwagens Lexus LF-A geflochten.

Ein großes Leichtbaupotenzial steckt auch in geflochtenen Crashboxen. Sie versagen nicht wie Metall durch Beulen und Falten. Vielmehr tritt eine Kombination aus unterschiedlichen Versagensformen auf, die man im Allgemeinen als „Crushen“ bezeichnet: Das Crashrohr wird von vorn beginnend zermahlen, sodass nur Faserreste und Staub übrigbleiben.

Der Vergleich des spezifischen Energieabsorptionsvermögens zeigt, warum: Während Stahl- und Aluminiumbauteile zwischen 15 und 25 kJ/kg aufnehmen können, schaffen Faserverbundwerkstoffe 70 bis 100 kJ/kg. Bisher wurde für Fahrzeuge der Zulassungskategorie L7E kein Frontalcrashsystem gefordert und deshalb auch nicht eingesetzt. Das im Rahmen des Mute-Projekts entwickelte Elektrofahrzeug wird

mit solchen Crashboxen ausgerüstet, um dem leichten Fahrzeug eine hohe passive Sicherheit zu verleihen.

Eine besondere Herausforderung ist auch die sichere Integration der schweren Batterieblöcke. Die hier vorhandenen hohen, konzentrierten Massen werden im Crashfall stark beschleunigt. Dabei muss sichergestellt werden, dass sie nicht aus ihrer Aufhängung am Rahmen gerissen werden. Hierzu werden derzeit am LLB Aufhängungs- und Anbindungskonzepte in Hybridleichtbauweise weiterentwickelt, die sowohl leicht als auch robust sind. Laminare, die abwechselnd aus faserverstärktem Kunststoff und Metallschichten aufgebaut werden, sind aufgrund ihrer im Vergleich zu rein metallischen Werkstoffen geringen Dichte vor allem für die Bereiche prädestiniert, wo Last eingeleitet wird und in denen ein komplexer Spannungszustand herrscht, prädestiniert.

Im Unterschied zu herkömmlichen Fahrzeugen hat das Elektromobil die Chance, durch Rekuperation die für Beschleunigung und Höhengewinn aufgewandte Energie wenigstens teilweise wieder zurückzugewinnen. Dadurch steigt die Bedeutung des Luftwiderstands für den Verbrauch und damit auch für die erzielbare Reichweite stark an: Eine kleine Stirnfläche und eine aerodynamische Form sind daher wesentliche Einflussfaktoren für die Gestaltung der Karosserie. Der optimalen Gestaltung eines Fahrzeugs – extrem flach und schmal – setzt die Alltagstauglichkeit Grenzen: Die Unterkante der Türen muss höher sein als ein normaler Bordstein. Der Ein- und Ausstieg sollte bequem sein, und die Passagiere wollen nebeneinander sitzen, um sich besser unterhalten zu können. Die neuen Faserverbundwerkstoffe setzen dagegen dem Design keine Grenzen mehr: Die neuen Elektroautos werden bequem, bezahlbar, sicher und form schön sein.

Ziel bei der anthropometrischen Innenraumauslegung eines Fahrzeugs ist es, dass der Fahrer in möglichst bequemer Haltung sitzt, dabei alle Bedienelemente gut erreicht und beste Sicht auf das Geschehen im Fahrzeug und außerhalb hat. Je nach Auslegungskonzept wird einer der in der Abbildung rechts dargestellten Körperpunkte des Menschmodells an einer definierten Position im Fahrzeug als fixer Ausgangspunkt angenommen. Für die anderen Körperpunkte ergeben sich wegen der unterschiedlichen Anthropometrien jeweils andere Felder, in denen diese zum Liegen kommen. Die kompakten Abmessungen des Elektroantriebs und die geänderten Anforderungen bezüglich Lenkung, Pedalerie und Anzeigeelementen ermöglichen neue Freiheiten zur Gestaltung des Innenraums.

Auf Grund der festen Position der Pedalerie wird bei der konventionellen Innenraumauslegung der Ferspunkt als im Fahrzeug fester Körperpunkt definiert. Um unterschiedlichen Personentypologien eine komfortable Haltung zu ermöglichen, müssen dann Verstellmöglichkeiten für das Lenkrad sowie für den Fahrzeugsitz vorgesehen werden. Darüber hinaus ergibt sich bei einer derartigen Auslegung ein sehr großer Bereich, in dem die Augen der Insassen liegen: Eine

komfortable Sicht ist so nur für einen Teil der potenziellen Fahrer und Fahrerinnen einstellbar.

Bei Fahrten im urbanen Raum hat jedoch das Thema Sicht einen hohen Stellenwert. Deshalb bietet sich in diesen Fällen ein Konzept an, bei dem der Augpunkt fixiert wird. Die Besonderheit bei dieser Auslegungsmethode liegt darin, dass nun die Pedalerie verstellbar sein muss. Der Fahrzeugsitz muss nur noch höhenverstellbar sein. Sowohl die Fünf-Prozent-Frau als auch der 95-Prozent-Mann finden so eine komfortable Haltung im Fahrzeug. Bedienelemente für sekundäre und tertiäre Aufgaben (Radio-Klima-Navi) müssen bei einem Augpunkt-Fix-Konzept sinnvoller Weise ebenfalls verstellbar sein. Aus diesem Grund bietet sich die Bedienung über ein zentrales Touch-Display an.



Augpunkt

Wichtige Körperpunkte für die anthropometrische Innenraumauslegung.

Handpunkt

H-Punkt

Ferspunkt

Natürlich ist dabei zu berücksichtigen, dass die Fünf-Prozent-Frau die Personentypologie mit der geringsten Armreichweite darstellt. Daher wird das Touch-Display auf einer Greifschale positioniert.

Das Augpunkt-Fix-Konzept öffnet den Weg zu völlig neuen Gestaltungsvarianten für den Fahrerarbeitsplatz. Beim Elektromobil liegt es nahe, auf die Pedalerie komplett zu verzichten und sowohl das Lenken als auch das Bremsen und Beschleunigen allein über ein aktives Steer-by-Wire-Stellteil vorzunehmen. Das Stellteil würde dann eine aktive Aktuatorik besitzen, die ein viel direkteres Fahrgefühl vermittelt. Bei dieser Technik könnte die aufwendige Pedalverstellung ganz entfallen. Der Fahrer würde somit auch aus der Zwangshal-

tung (Treten des Pedals) gelöst werden, die Bein und Rückenmuskulatur wäre weniger aktiv, Rückenschmerzen beim Autofahren würden zurückgehen.

Die Kopplung des aktiven Stellteils mit Assistenzsystemen gibt dem Fahrer eine haptische Rückmeldung, die sehr viel schneller verarbeitet wird als optische oder akustische Signale: Tritt zum Beispiel die Abstandsregelung ACC in Aktion, würde dies nicht zu einem Warnlicht oder -ton führen, sondern beispielsweise zu einer Positionsveränderung am Stellteil, oder dessen Gegendruck steigen lassen. Allerdings: Die aktuelle Gesetzeslage lässt die Steer-by-Wire-Technologie derzeit noch nicht zu, da bei Lenkrad und Bremse eine mechanische Rückfallebene vorhanden sein muss.

Neben dem Tachometer ist das wichtigste Anzeigeelement eines Elektromobils ein intelligentes Instrument zur Reichweiten- und Verbrauchsanzeige. Der Schlüssel zur maximalen Reichweite ist ein Interface, das zu sicherem und verbrauchsreduziertem Fahren motiviert. Neben dem aktuellen Verbrauch zeigt es die resultierende Reichweite und gibt idealerweise auch Vorschläge zu optimiertem Fahrverhalten.

Durch die Verwendung von Displays anstelle von statischen, analogen Instrumenten ist es möglich, dem Fahrer nur kontextrelevante Informationen darzustellen. Am Lehrstuhl für Ergonomie laufen derzeit mehrere Forschungsprojekte zu diesen Fragen.

Der Wärmebedarf eines Fahrzeugs liegt bei bis zu zehn Kilowatt und ist damit ähnlich hoch wie der eines Einfamilienhauses. Durch Methoden aus der Passivhaustechnologie lässt sich der Bedarf um über 50 Prozent senken. Das erweitert die Reichweite beträchtlich – sofern die Wärmeenergie vom Akkumulator geliefert werden muss. Es gibt aber noch andere Möglichkeiten: z. B. eine solar betriebene Lüftung.

Sie kühlt, wenn das Auto in der Sonne steht, und die Klimaanlage dient gleichzeitig als Wärmepumpe; außerdem kann man die Abwärme der Elektronikkomponenten nutzen.

Eine CO₂-neutrale Beheizung erhält man, wenn die Wärme aus Bioethanol gewonnen wird.

Heutige Fahrzeuge heizen große Luftmengen an, um ein behagliches Temperaturniveau herzustellen. Sparsamer geht es, wenn der Sitz direkt beheizt wird, und Hände und Gesicht mit Strahlungswärme. Untersuchungen des Lehrstuhls für Ergonomie zeigen, dass diese sogar als angenehmer empfunden wird als die bisherigen Systeme.

Autoren

Dipl.-Ing. Jan Both, Technische Universität München, Lehrstuhl für Leichtbau (Prof. Dr.-Ing. Horst Baier)

Dipl.-Ing. Florian Kremser, Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie (Prof. Dr. Klaus Bengler)

Dipl.-Ing. Olaf Rüger, Technische Universität München, Lehrstuhl für Carbon Composites (Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler)