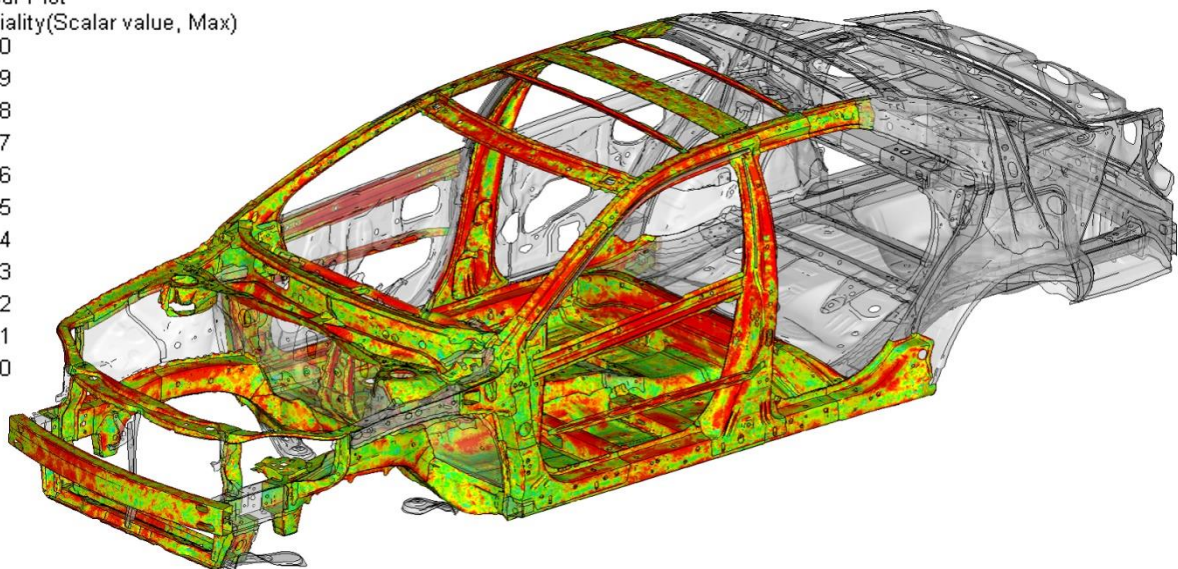
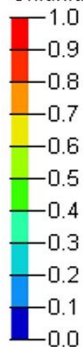


Contour Plot  
Uniaxiality(Scalar value, Max)



Bildquelle: @LiA / BENTELER

## Beanspruchungsgerechte und ressourcenschonende Auslegung von Hybridbauteilen

*Dr.-Ing. Christian Hielscher, F&E Manager*

*Julian Grenz, M.Sc., F&E Projektingenieur*

*BENTELER Automobiltechnik GmbH (BAT), Forschung und Entwicklung*

*Alan A. Camberg, M.Sc., Gruppenleiter Simulation*

*Nils Wingenbach, M.Sc. wissenschaftlicher Mitarbeiter Simulation*

*Universität Paderborn, Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen, Leichtbau im Automobil (LiA)*

**Dieser Fachartikel erschien am 10.7.2020 in ATZ 7/8 2020**

---

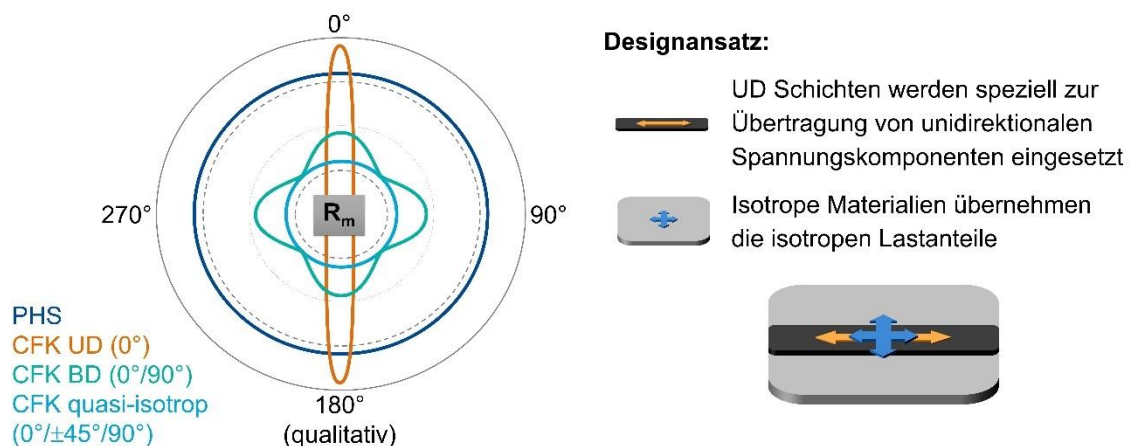
BENTELER und das Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen der Universität Paderborn erarbeiteten gemeinsam einen simulationsbasierten Ansatz zur beanspruchungsgerechten und ressourceneffizienten Auslegung von hybriden Bauteilen aus Metall und faserverstärkten Kunststoffen.

### Motivation

Fortlaufend steigende gesetzliche Forderungen zur Reduktion des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) zwingen die Fahrzeughersteller neben dem Einstieg in die Elektromobilität zu effizienteren Verbrennungsmotoren, hybriden Antrieben und geringen Fahrzeuggewichten. Um weitere Gewichtseinsparungen zu ermöglichen, wurde in den vergangenen Jahren der Einsatz kohlefaserverstärkter Kunststoffe (CFK) viel diskutiert und inzwischen auch außerhalb der Kleinserie realisiert [1]. Trotz ihrer herausragenden Leichtbaueigenschaften weisen diese Werkstoffe jedoch auch eine Reihe von nicht zu vernachlässigenden Nachteilen auf (z.B. hohe CO<sub>2</sub> Aufwendungen bei der Herstellung, ungünstiges Versagensverhalten, bedingte Recyclingfähigkeit, hohe Produktionskosten).

Faserverstärkte Kunststoffe können vor allem dann ihr Leichtbaupotential aufzeigen, wenn sie gezielt und belastungsgerecht eingesetzt werden. Ein Strang an Endlosfasern ist immer dann am effizientesten, wenn die Belastung in Faserrichtung verläuft. Anderenfalls müssen Fasern in unterschiedlicher Richtung z.B. in Form eines Gewebes eingesetzt werden (z.B. für quasi-isotropes Werkstoffverhalten in 0°, ±45° und 90° Richtung). Dies jedoch verschlechtert das Leichtbaupotential, aber insbesondere auch die Kosten und den notwendigen CO<sub>2</sub>-Einsatz bei der Herstellung.

In dem hier vorgestellten Kooperationsprojekt verfolgten die Partner einen angepassten effizienteren Designansatz. Faserverstärkte Kunststoffe werden nur als unidirektionale Tapes eingesetzt und übernehmen dominierende Spannungskomponenten in unidirektionaler Richtung. Sonstige Spannungskomponenten werden über einen isotropen metallischen Werkstoff übernommen, so dass ein belastungsangepasster Werkstoffhybrid entsteht, Bild 1.

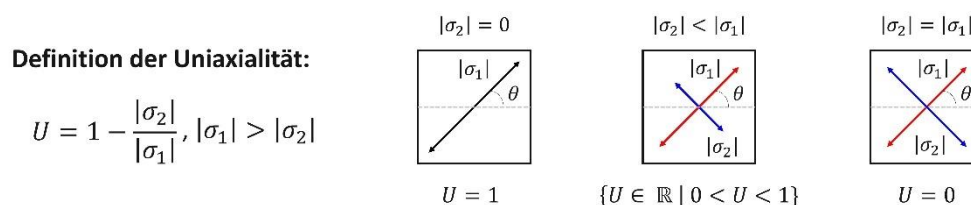


**Bild 1** Beanspruchungsgerechtes Hybridbauteildesign (© BAT, LiA)

Haupt Herausforderung bei dieser Vorgehensweise ist, dass Bauteile in der Karosserie identifiziert werden müssen, die eine dominierende Spannungsrichtung bei den unterschiedlichen möglichen Crashbelastungen aufweisen. Diese ermöglichen die Integration eines Faserstrangs auf einer metallischen Grundkomponente.

### Ansatz zur Ermittlung der Spannungsuniaxialität

Um den genannten Herausforderungen zu begegnen, wurde ein bereits aus [2] und [3] bekannter Ansatz weiterentwickelt. Dieser basiert auf der Definition eines skalaren Kennwertes, welcher die Uniaxialität  $U$  des Spannungstensors charakterisiert. Dieser Kennwert nimmt Beträge zwischen 0 (äqui-biaxialen) und 1 (uniaxial) ein, Bild 2.



**Bild 2** Uniaxialität ausgewählter Spannungszustände (© LiA)

Einen wesentlichen Aspekt der Weiterentwicklung bildet hierbei die Strategie zur Akkumulation der Uniaxialität über mehrere Zeitschritte und Lastfälle hinweg. Hierzu werden die einzelnen Spannungskomponenten aufsummiert, wobei durch eine gezielte Modifikation und Gleichsetzung von Spannungen sichergestellt wird, dass es bei der Summation zu keiner Aufhebung von Werten unterschiedlicher Vorzeichen kommt. Gleichzeitig wird gewährleistet, dass die ursprüngliche Hauptrichtung und der Betrag der Spannungen beibehalten wird. Der Vorteil ist, dass sowohl eine Information über die Richtung der resultierenden Spannung vorliegt, als auch eine betragsmäßige Gewichtung der einzelnen Zeitschritte und Lastfälle bei der Aufsummierung vorgenommen wird. Der skalare Wert der Uniaxialität wird im finalen Schritt aus den Beträgen der Hauptnormalspannungen des akkumulierten Spannungstensors bestimmt.

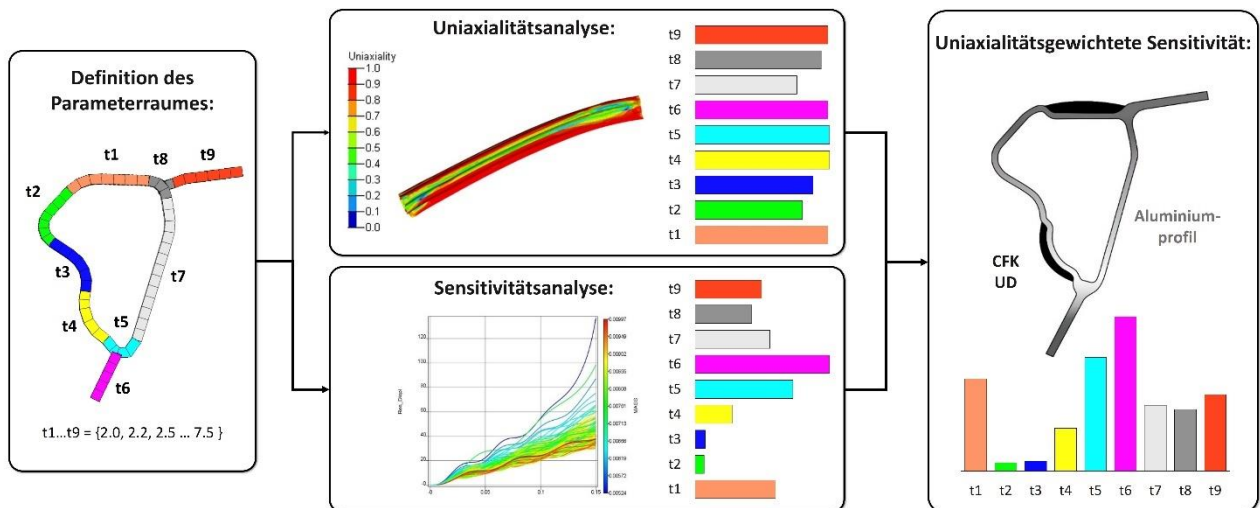
### **Bewertung eines Gesamtfahrzeugs bezüglich der im Crashfall auftretenden Uniaxialitäten**

Für die Verifizierung der Methode wird das frei verfügbare Gesamtfahrzeugmodell des Toyota Camry 2012 verwendet [4]. Die Bewertung des Fahrzeugmodells erfolgt anhand mehrerer für die Fahrzeugentwicklung typischer Crashlastfälle. Eine Beschränkung auf strukturelevante Bauteile sowie ein Schwellwert für kritische Spannungsbeträge ermöglicht eine Reduktion der auszuwertenden Datenmenge. Liegen die Berechnungsergebnisse der Lastfälle vor, durchlaufen alle relevanten Elemente eine Berechnungsroutine und ein Contour-Plot der Uniaxialität kann dargestellt werden (siehe Eröffnungsbild). Eine zusätzliche Anzeige der resultierenden Spannungsrichtungen ermöglicht die Beurteilung der Eignung für einen Fasereinsatz bezüglich der Ausrichtung.

### **Der Entwicklungsansatz für beanspruchungsangepasste Strukturkomponenten**

Die akkumulierte Uniaxialität der Komponenten diente als Ausgangspunkt für die vorgenommene Komponentenentwicklung. Als Demonstratorgruppe wurden die A-Säulen und der vordere Dachquerträger ausgewählt. Diese Komponenten besitzen eine hohe Uniaxialität und stellen einen Teil der starren Fahrgastzelle dar - beides hervorragende Voraussetzung für einen effizienten CFK-Einsatz.

Zu Beginn der Komponentenentwicklung wurde eine Topologiestudie unter Berücksichtigung des verfügbaren Bauraums und der relevanten Lastfälle durchgeführt. Aufbauend auf der idealen Bauteiltopologie folgte die Ableitung mehrerer konstruktiver Konzeptentwürfe. Diese wurden mithilfe vereinfachter FE-Modelle bewertet und gegenübergestellt. Das vielversprechendste Konzept - ein durchgängiges Aluminium-Strangpressprofil mit unidirektionalen Verstärkungstreifen - wurde in weiteren Entwicklungsstufen detailliert ausgearbeitet. Entscheidend für die Anordnung der Verstärkungsfasern war die innerhalb des Projektes entwickelte Auslegungsmethode. Diese basiert auf der Ermittlung der Sensitivität einzelner Querschnittsabschnitte des Profils, welche nachfolgend mit der Uniaxialität des dazugehörigen Querschnittsabschnitts gewichtet wird. Der so ermittelte Kennwert ermöglichte eine werkstoffgerechte Auslegung in Bereichen ausgeprägter Uniaxialität und gewährleistete zugleich, dass die verhältnismäßig teuren Verstärkungsfasern kosteneffizient an Stellen eingesetzt wurden, die eine hohe Bedeutung für das Bauteilverhalten haben, Bild 3.



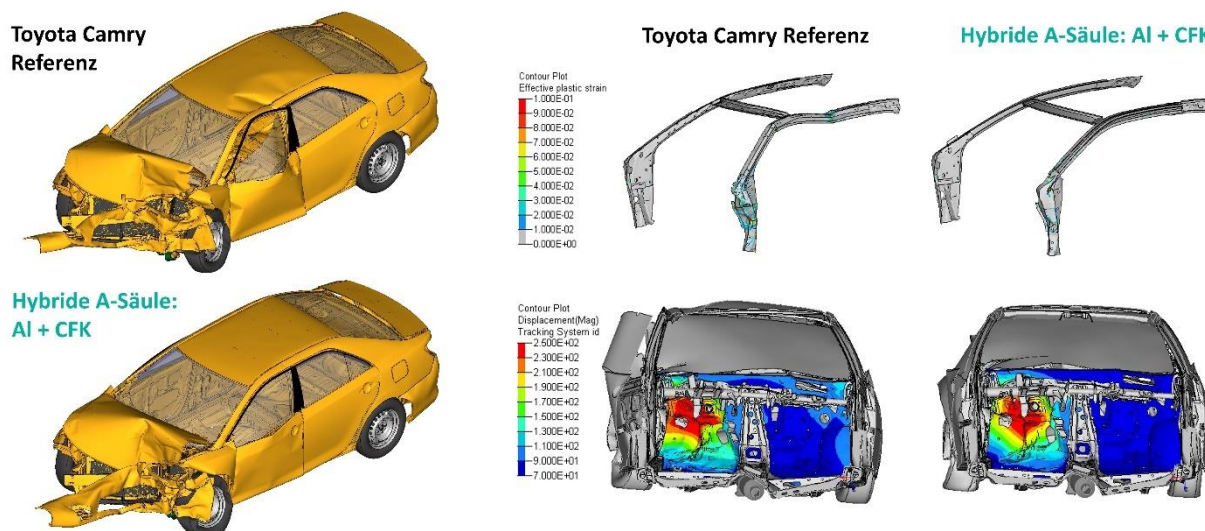
**Bild 3** Methodik zur Auslegung hybrider Bauteile mit Faserverstärkungen (© LiA)

Der untere A-Säulenbereich wurde aufgrund vorherrschender mehrachsiger Beanspruchung als Schalenkonstruktion ausgelegt. Die auf das Biegemoment angepasste Konstruktion aus pressgehärtetem Stahl erlaubte eine beanspruchungsgerechte Aufnahme des hybriden A-Säulenprofils. Die Anbindung zwischen dem Aluminium-Strangpressprofil und den Blechschalen aus Stahl konnte dank patentierter SWOPtec Fügehilfselemente durch konventionelles Widerstandspunktschweißen realisiert werden. Hierzu werden vorab beschichtete Stahlelemente in den Aluminiumfügepartner eingestanzt. Der Dachquerträger wurde trotz hoher Uniaxialität als monolithisches Aluminiumblechteil mithilfe des BENTELER-patentierten Blitzformverfahrens [5] gefertigt, da durch Hybridbauweise kein wesentlicher Gewichtsvorteil erzielt werden konnte. Die Anbindung des Dachquerträgers zur A-Säule wurde durch einen lastpfadangepassten Knoten aus Aluminium-Strangpressprofil realisiert, Bild 4.



**Bild 4** Demonstrator einer Baugruppe in Hybridbauweise (© BAT, LiA)

Die Eigenschaften der neuen hybriden A-Säule konnten sowohl durch Gesamtfahrzeugsimulationen (Bild 5), wie auch durch experimentelle Komponentenversuche bestätigt werden. So erreicht die A-Säule bei besserer Crashperformance eine Gewichtsreduktion von 27 Prozent gegenüber der Referenzstruktur des Toyota Camry 2012. Gegenüber einer pressgehärteten Stahlvariante, die den heutigen Craschanforderungen entspricht, erreicht diese sogar eine Gewichtsreduktion von 46 Prozent.



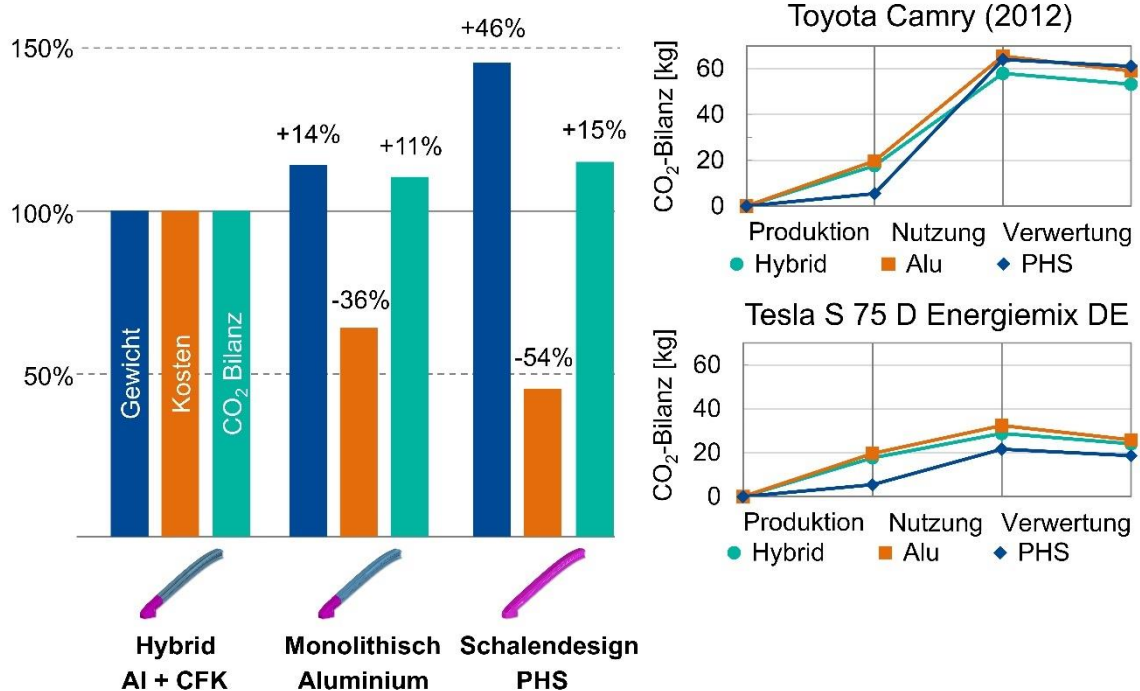
**Bild 5** Performancevergleich im Euro NCAP Front Offset Deformable Barrier Test bei 64 km/h (© LiA)

### Kosten- und Ökobilanz

Bei der Auslegung von gewichtsoptimierten Strukturbauteilen im Fahrzeug ist es wichtig, neben dem Gewicht auch die Auswirkungen auf die Produktionskosten und die Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu berücksichtigen. Eine entsprechende Analyse wurde auch für die hybride A-Säule durchgeführt, Bild 6.

Bei der Kostenanalyse wurde eine Produktion von 60.000 Fahrzeugen pro Jahr angenommen. Dies entspricht einer üblichen Stückzahl im Premiumsegment, für die der Einsatz von CFK realistisch ist. Trotz des sehr gezielten Einsatzes von CFK konnte keine Kostenneutralität gegenüber den konventionellen Varianten erreicht werden (Einsparungspotential Aluminiumvariante 36 Prozent bzw. pressgehärtete Variante (PHS) 54 Prozent). Bei geringeren Stückzahlen verringert sich dieser Kostenvorteil, so dass z.B. für Derivate die hybride Variante dennoch wirtschaftlich sein kann.

Die durchgeführte Ökobilanz mit Fokus auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß berücksichtigt unter Verwendung von Datenbankinformationen den gesamten Lebenszyklus eines Verbrennungsfahrzeuges (Toyota Camry 2012) bei einer Nutzungsdauer von 150.000 Kilometern. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß während der Herstellung der hybriden A-Säule ist aufgrund des gezielten und effizienten CFK-Einsatzes vergleichbar mit der Aluminium A-Säule, wobei dies etwa viermal größer ist als bei der Stahlvariante. Dies wird jedoch durch das geringere Gewicht während der Nutzungsphase kompensiert. Nach etwa 100.000 Kilometern ist ein Break-Even zwischen der hybriden und der Stahl A-Säule zu erkennen. Über den gesamten Lebenszyklus wird bei der Verwendung der hybriden A-Säule gegenüber der reinen Aluminium Variante 11 Prozent und gegenüber der Stahlvariante 15 Prozent weniger CO<sub>2</sub> ausgestoßen.



Kostenbasis: 60.000 Fahrzeuge (Verbrenner) pro Jahr

**Bild 6** Variantenvergleich und Ökobilanz (© BAT, LiA)

Werden die Ergebnisse nun auf ein Elektroauto übertragen, so nimmt die Bedeutung der Herstellungsphase und der Verwertungsphase gegenüber der Nutzungsphase deutlich zu und die Stahlvariante zeigt über den Lebenszyklus die beste CO<sub>2</sub>-Bilanz.

### Zusammenfassung und Ausblick

Das im Kooperationsprojekt entwickelte Analysewerkzeug zur Identifikation von Bauteilen mit hohen uniaxialen Spannungsanteilen bei verschiedenen möglichen Crashszenarien ermöglicht den gezielten Einsatz von unidirektionalen Fasern in Verbindung mit klassischen isotropen metallischen Werkstoffen. Auf diese Weise können selbst kohlefaserverstärkte Kunststoffe vergleichsweise kosten- und ressourceneffizient eingesetzt werden. Dennoch übersteigen die Kosten für das Hybridbauteil die klassischen Bauteile deutlich und es muss von Fall zu Fall abgewogen werden, wann entsprechende Mehrkosten gerechtfertigt sind.

Bei der Übertragung der Ergebnisse auf Elektrofahrzeuge verschiebt sich die CO<sub>2</sub>-Bilanz für den gesamten Fahrzeuglebenszyklus zugunsten des Werkstoffes Stahl. Der steigende Anteil erneuerbarer Energiequellen wird in Zukunft die Bedeutung der Herstellungs- und Verwertungsphase weiter verstärken, sodass die Entwicklung nachhaltiger Werkstoff- und Bauteilkonzepte an Bedeutung gewinnt.

### Über BENTELER

BENTELER ist ein weltweit agierendes Familienunternehmen für Kunden aus den Bereichen Automobiltechnik, Energie und Maschinenbau. Als innovativer Partner entwickeln, produzieren und vertreiben wir sicherheitsrelevante Produkte, Systeme und Dienstleistungen.

Unter der Führung der strategischen Managementholding BENTELER International AG mit Sitz in Salzburg, Österreich, sind die Divisionen BENTELER Automotive und BENTELER Steel/Tube organisiert.

Unsere rund 30.000 Mitarbeiter an 100 Standorten in 28 Ländern bieten erstklassige Herstellungs- und Vertriebskompetenz – leidenschaftlich und nah am Kunden.

BENTELER. Die Familie der Lösungsmacher. Seit 1876.  
[www.benteler.com](http://www.benteler.com)

### Über BENTELER Automotive

BENTELER Automotive ist der Entwicklungspartner für die weltweit führenden Automobilhersteller. Mit rund 26.000 Mitarbeitern und mehr als 70 Werken in rund 25 Ländern erarbeitet BENTELER Automotive für maßgeschneiderte Lösungen für seine Kunden: Die Produkte umfassen Komponenten und Module für Fahrwerk, Karosserie, Motor- und Abgassysteme sowie Lösungen für Elektrofahrzeuge.

[www.benteler-automotive.com/de/](http://www.benteler-automotive.com/de/)

### Literatur

- [1] **Frei P. (2016)** *The hybrid B-pillar in the new BMW 7 Series. An example for the manufacturing implementation of an innovative steel-CFRP lightweight design concept.* Materials in Car Body Engineering 2016, Bad Nauheim, 2016.
- [2] **Durst K.G. (2008)** *Beitrag zur systematischen Bewertung der Eignung anisotroper Faserverbundwerkstoffe im Fahrzeugbau.* Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.
- [3] **Grote M. (2018)** *Entwicklung einer Methode zur anforderungsgerechten Werkstoffauswahl und Strukturauslegung von PKW-Karosserien im Multi-Material-Design.* Dissertation, Universität Siegen, 2018.
- [4] **CCSA (2016)** *Development & Validation of a Finite Element Model for the 2012 Toyota Camry Passenger Sedan, Tech Summary.* George Mason University, Centre for Collision Safety Analysis (CCSA), doi: 10.13021/G8N88, 2016.
- [5] **Camberg A. A., Bohner F., Tölle J., Schneidt A., Meiners S., Tröster T. (2018)** *Formability enhancement of EN AW-5182 H18 aluminum alloy sheet metal parts in a flash forming process: testing, calibration and evaluation of fracture models.* IOP Materials Science and Engineering 418(1):012018; doi: 10.1088/1757-899X/418/1/012018, 2018.