

I. Holzverbundwerkstoffe im Automobilbau der Zukunft? – Crashtests und Simulation von Holzwerkstoffen vorausgesetzt!

Ulrich Müller, Florian Feist und Thomas Jost

Institut f. Holztechnologie u. Nachwachsende Rohstoffe, Universität f. Bodenkultur, Wien

Tel.: +43 (0) 1 47654 - 89112

E-Mail: ulrich.mueller@boku.ac.at

<http://www.woodcar.eu>

Nachhaltigkeit, Materialverfügbarkeit, Multimaterialmix und Leichtbau sind zentrale Trends des zukünftigen Fahrzeugbaus. Nach neuen Materialien und Materialkombinationen wird intensiv gesucht. Holz besitzt hervorragende Werkstoffeigenschaften bei niedriger Dichte. Richtig eingesetzt sind Holzwerkstoffe kompetitiv zu faserverstärkten Kunststoffen und Metallen. Die technische Leistungsfähigkeit des Materials ist durch den Jahrzehnte langen Einsatz in der Luftfahrttechnik und durch Fahrzeuganwendungen belegt. Holz verfügt über Eigenschaften, die einen breiten Einsatz im Mobilitätssektor rechtfertigt. Durch die Einbeziehung des Werkstoffs Holz kann die Palette möglicher Werkstoffe für das Material-Engineering erweitert werden, wodurch ein wertvoller Beitrag für Kosten- und Gewichtsreduktion sowie für die CO₂-Bilanz geleistet werden kann. Der Einsatz von Holz in den angesprochenen Bereichen erfordert allerdings eine präzise und zuverlässige mathematische Beschreibung des Materialverhaltens im Belastungs- und Crashfall. Jüngste Forschungsergebnisse zeigen hervorragende Übereinstimmung zwischen Simulation und tatsächlichem Werkstoffverhalten.

Schlüsselwörter: Crashsimulation, FEM, Holz im Fahrzeugbau, Materialsimulation

Einleitung

Motivation

Veränderungen in der Fahrzeugtechnik führt zur Suche nach neuen Leichtbaumaterialien (Ahlers (2012), Hagemann et al. (2012), Lehold (2012), Müller (2012), Bernhardt (2013), Friedrich (2013), Böhm und Kohl (2014), De Oto (2015), Hambrecht und Müller (2015), Kohl und Böhm (2015), Tesch (2015)). So wird im modernen Fahrzeugbau eine zunehmende Menge an Verbundwerkstoffen verbaut (Duflou et al. (2012), Herbeck und Lang (2012), Shah (2013), Coquel (2014), Faruk et al. (2014), Hambrecht und Müller (2015)). Material- und Fertigungskosten dieser Materialien führen aber vielfach zu einer Erhöhung der Produktkosten. Der Leichtbauwerkstoff Holz stellt eine ökologische und verfügbare Ressource dar. Richtig eingesetzt verfügt Holz über exzellente mechanische Eigenschaften. Daher wurde Holz in der Vergangenheit als Konstruktionsmaterial im Maschinen-, Fahrzeug- und Flugzeugbau eingesetzt. Der erhöhte Fertigungsaufwand war sicher ein wesentlicher Grund, warum Holz in diesen Bereichen durch Metalle substituiert wurde.

Im Bereich der Materialbeherrschung, Berechenbarkeit und der Fertigungstechnologie hat sich der Werkstoff Holz in den letzten 30 Jahren sprunghaft weiterentwickelt. Materialsimulation von Holz wurde bislang vorrangig im Holzbau und damit für Nadelholz durchgeführt. Der Einsatz von Holz im Mobilitätssektor erfordert aber die Verwendung von Laubhölzern. Kennwerte für die Materialsimulation dieser Hölzer sind teilweise aus der Zeit der 30er bis 50er Jahre des letzten Jahrhunderts verfügbar. In dieser Zeit wurden große Forschungsprogramme für die Charakterisierung des Werkstoffs Holz und daraus hergestellter Produkte durchgeführt. Die Erkenntnisse der damaligen Holzforschung zählen vielfach noch heute zum Stand der Technik (Kollmann und Côté (1968), Niemz (1993), Klein et al. (2016)).

In den letzten Jahren wurde der mögliche Einsatz von Holz in der Automobilindustrie intensiv diskutiert. Einige OEMs haben bereits erste Forschungsaktivitäten in diese Richtung initiiert (z.B. Projekt HAMMER und Folgeprojekt For^(s)tschritt in Kooperation mit VW (Böhm et al. (2013), Böhm (2014), Kohl und Böhm (2014, 2015), Kohl et al. (2014a und b), Schelper et al. (2014)).

Diese Projekte zeigen einerseits das Potential des Werkstoffs, andererseits auch die Limitierung, denn Entwicklungsprozess, Konstruktion und Engineering sind in der Automobilindustrie direkt mit Simulationsprogrammen verknüpft. Ohne Materialmodelle und Materialkarten können Werkstoffe nicht simuliert werden. Eine exakte Kenntnis der Werkstoffeigenschaften stellt daher die Grundvoraussetzung für die Simulationsfähigkeit und damit den Einsatz von Holz im Mobilitätssektor dar. Eine Überprüfung, ob das Verhalten von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen mit der geforderten Güte mittels Simulationsprogrammen berechnet werden kann, war daher Inhalt der hier vorgestellten Studie.

FE Simulation von Holz

Finite Element Modelling hat in den letzten zwei Jahrzehnten vorrangig im Baubereich Einzug gehalten (Tabiei und Wu (2000), Lukacevic et al. (2014), Kandler et al. (2014), etc.). Aufgrund fertigungstechnischer und materialtechnischer Gründe erscheint nach heutigem Stand des Wissens vorrangig Laubhölzer in Form von Schichtholz, Sperrholz und Lagenhölzer in Kombinationen mit faserverstärkten Kunststoffen oder Metallen als Werkstoff für technische Anwendungen im Fahrzeugbereich geeignet zu sein. Der Einsatz von Materialien im Mobilitätssektor verlangt neben statischer Auslegung auch die Berechnung unter dynamischer Beanspruchung und im Crashfall. Crashsimulationen von Holz liegen bislang nicht vor. Im Zuge dieser Studie wird die klassische Vorgehensweise bei der FE Crashberechnung am Beispiel Holz dargestellt (**Abb. I-**).

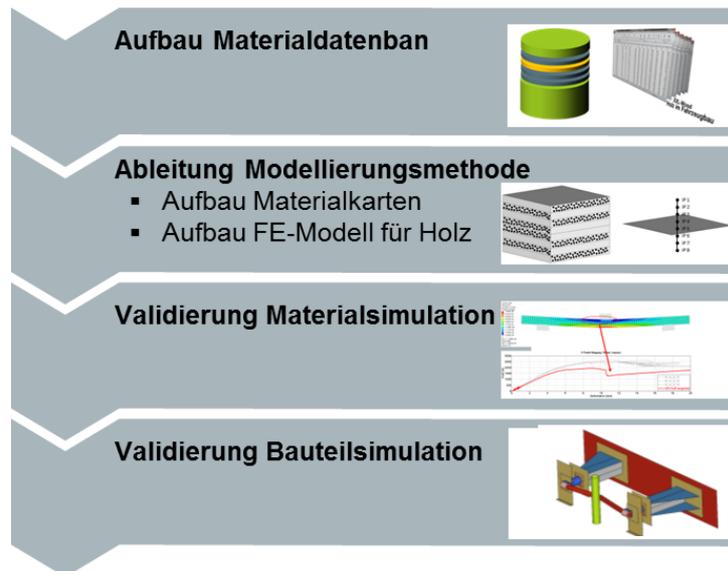


Abb. I-1: Vorgehensweise zur Erstellung einer Modellierungsmethode für Holz im Crash.

Material und Methoden

Grundlage Materialsimulation: Materialdatenbank

Eine Materialsimulation benötigt ein geeignetes Materialmodell und entsprechende Kenndaten. Die Kenndaten von Buche, Birke und Esche wurden anhand von quasistatischen Norm-Versuchen mit sogenannten Clearwood Samples erhoben. Weitere Versuche wurden mit Birken- und Buchensperrhölzern, mit Lagenhölzern sowie mit mitteldichter Faserplatte durchgeführt. Insgesamt wurden bislang mehr als 2.000 Einzelprüfkörper bis zum Bruch in einer Universalprüfmaschine (Zwick/Roell, Deutschland) belastet. Dabei wurden neben dem Elastizitätsmodul und der Festigkeit auch die Poissonsahl, die Proportionalitätsgrenze, das plastische Verformungsverhalten sowie die Materialentfestigung für die mechanische Charakterisierung der untersuchten Hölzer in die unterschiedlichen Belastungsrichtungen ermittelt. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach gültigen Holznormen (DIN 52188, DIN 52185, DIN 52192, DIN 52186, DIN 52189, EN 408, EN 302). Der Schubmodul wurde entsprechend Müller et al. (2015) mittels der Arkan Schubprobe ermittelt. Das Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, BOKU Wien, verfügt über einen großen Datenpool für Holzwerkstoffe. Mechanische Kenndaten von bisherigen Projekten (z.B. Grabner 2017) wurden in eine Datenbank mit nunmehr über 60.000 Einzelwerten eingepflegt.

Crashmodellierung von Holz

Die Modellierungsmethode für Holz im Crash muss den grundlegenden Anforderungen des virtuellen Fahrzeugentwicklungsprozesses genügen. D.h., dass die Methode eine virtuelle Auslegung des mechanischen Eigenschaftsprofils von Bauteilen bestehend aus Holzverbundwerkstoffen zulassen muss. Dementsprechend wurde im Rahmen der Studie die in **Abb. I-** dargestellte Vorgehensweise zur Materialkartenerstellung von Holzverbundwerkstoffen verfolgt. Anhand einer Basis-Materialcharakterisierung von Massivholz wird eine Materialkarte, welche für Volumen- und Schalenelemente verwendet werden kann, aufgebaut und validiert. Darauf aufbauend werden Schicht- und Sperrhölzer mit der identen Materialkarte berechnet. Anhand von entsprechenden Materialversuchen wird das Ergebnis der FE Simulation verifiziert. Zeigt sich hier eine Übereinstimmung von Simulation und Versuch, steht im ersten Schritt eine qualitative Modellierungsmethode für die virtuelle Potentialanalyse von Holzverbundbauteilen im Crashlastfall zur Verfügung.

Im Zuge der Studie wurde für die FE Berechnung die Software LS-DYNA eingesetzt, welche als Standardsoftware für Crash in der Automobilbranche gebräuchlich ist.

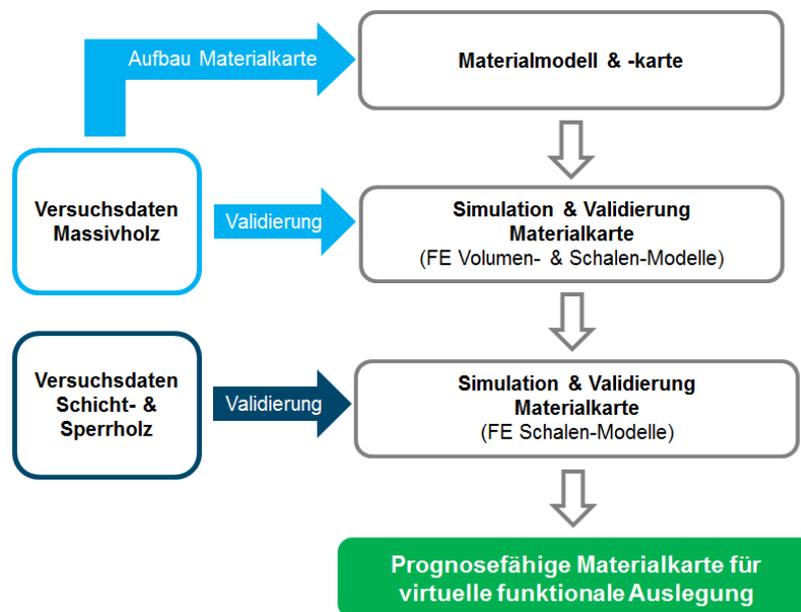


Abb. I-2: Vorgehensweise zur Materialkartenerstellung für Holzverbundwerkstoffe.

Ergebnisse und Diskussion

Validierung der Materialsimulation

Auf Basis des oben beschriebenen Materialmodells wurde die Materialkarte in LS-DYNA für die Berechnung von Massivholz für die Holzwerkstoffe Rotbuche, Esche und Birke anhand von Versuchsdaten aufgebaut. Die erstellte Materialkarten wurden anhand der Versuchslastfälle Zug und Druck (Beispiel siehe **Abb. I-**) mittels 3- und 4-Punkt-Biegung validiert. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem gewählten Simulationsansatz das Materialverhalten von Massivholz hinreichend genau simuliert werden kann. Vergleichbare Ergebnisse konnten auch mit den Schalenelementen erreicht werden.

Validierung Crashsimulation: Demonstratorbauteilen aus Holz

Die im Rahmen der Studie entwickelten Holz-Demonstratorbauteile wurden vom Konzeptfahrzeug CULT (Cars Ultra Light Technologies) des Kooperationspartners Magna Steyr Engineering (MSE) abgeleitet. Grundsätzlich wurden folgende potentielle Fahrzeugstrukturkomponenten für die Bauteilumsetzung in Holz ausgewählt: Rücksitzlehne, Armaturenräger und Unterboden mit Zentraltunnel (s. **Abb. I-**). Diese Bauteile wurden nach den originalen Dimensionen und vorgegebenen Geometrien in Holzverbundbauweise aufgebaut.

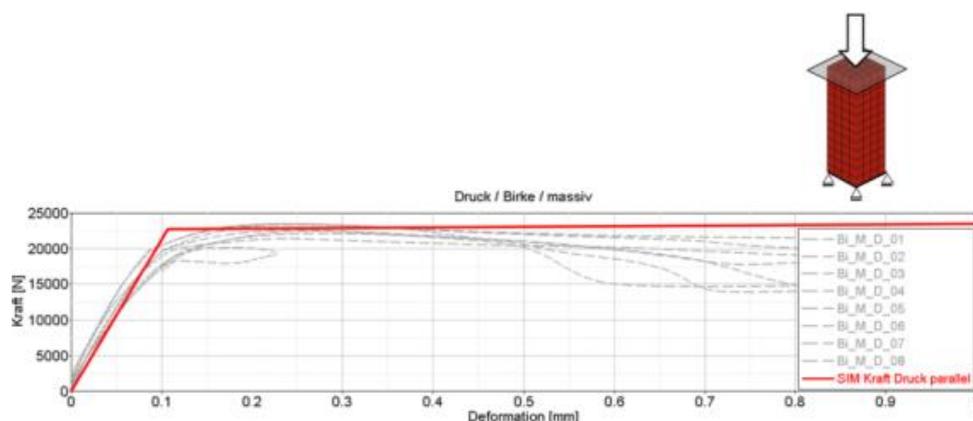


Abb. I-3: FE Modelle des Versuchslastfalls Druck; Vergleich Simulation (rot) mit Versuchen (grau).

Die Zielsetzung dabei war es nicht, gegenüber den bestehenden Komponenten mit den Holzbauteilen kompetitiv zu sein, sondern die Berechenbarkeit von Holzverbundbauteilen unter Crashbedingungen nachzuweisen. Werkstoffspezifische Bauteiloptimierungen wurden daher nicht durchgeführt.

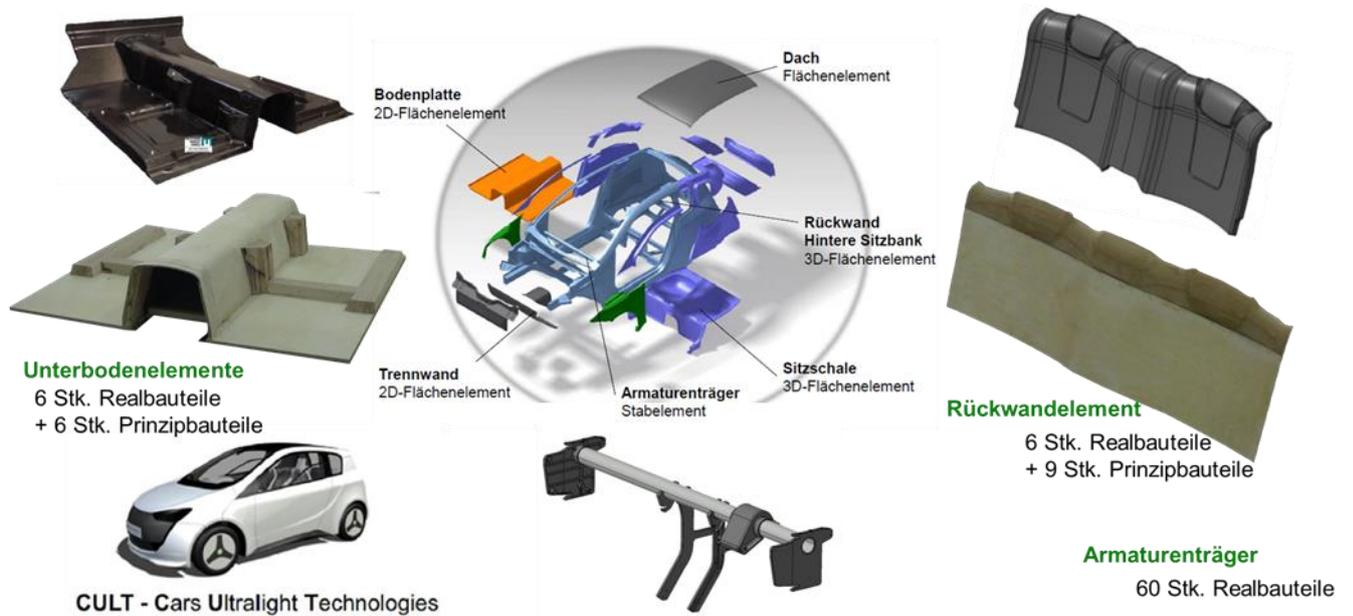


Abb. I-4: Darstellung der Holz-Demonstratorbauteile.

Für die Crashversuche wurde ein Prüfstands Aufbau konzipiert, mittels FE Simulation in LS-DYNA ausgelegt und am Institut für Fahrzeugsicherheit der TU Graz aufgebaut (s. **Abb. I-1**). Der Versuchsstand bestand aus einem Auflager, bestückt mit Kraftmessdosen, und aus einem Impaktor mit einem Gewicht von 30 kg, der auf 9 m/s (ca. 32 km/h) beschleunigt wurde. Die Beschleunigung des Impaktors wurde mittels Beschleunigungssensor gemessen. Die Aufzeichnung der Verformung der Bauteile erfolgte durch drei Hochgeschwindigkeitskameras.



Abb. I-5: Prüfstands Aufbau für Holz-Crashversuche. Die Abbildung zeigt das Eindringen des Impaktors in eine Rückenlehne.

Anhand der generierten Crashversuchsdaten zu den drei Holz-Demonstratorbauteilen wurden die entsprechenden Bauteil FE Modelle validiert. In **Abb. I-** wird der Vergleich zwischen Simulation und Versuch am Beispiel des Demonstrators Armaturenräger für die Baukonzepte a) Vollquerschnitt Massivholz, b) Rohrquerschnitt Massivholz und c) Rohrquerschnitt Schichtholz unter Crashlast und statischer Last dargestellt. Die grüne, rote und schwarze Linie stellt jeweils das Ergebnis für die berechnete Kraft dar. Die grauen Linien stellen die gemessenen, gefilterten Kraftsignale aus den Versuchen dar. Der Vergleich der Ergebnisse aller drei Baukonzepte zeigt bis kurz nach dem initialen Versagen (= erster Peak in den Kraftsignalen) eine sehr gute quantitative Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch für den Crashlastfall. Die danach auftretenden Abweichungen in den Signalen und im Verlauf der Schädigungsbilder sind durch Vereinfachungen im FE Modellaufbau sowie durch die fehlende Berücksichtigung des Klebstoffs begründet. Im statischen Lastfall zeigen die beiden Massivholzvarianten Voll- und Rohrquerschnitt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem abgeleiteten Modellansatz funktionale Strukturkomponenten, bestehend aus Holzverbundwerk-

stoffen, qualitativ in einer frühen Fahrzeugentwicklungsphase ausgelegt und bewertet werden können.

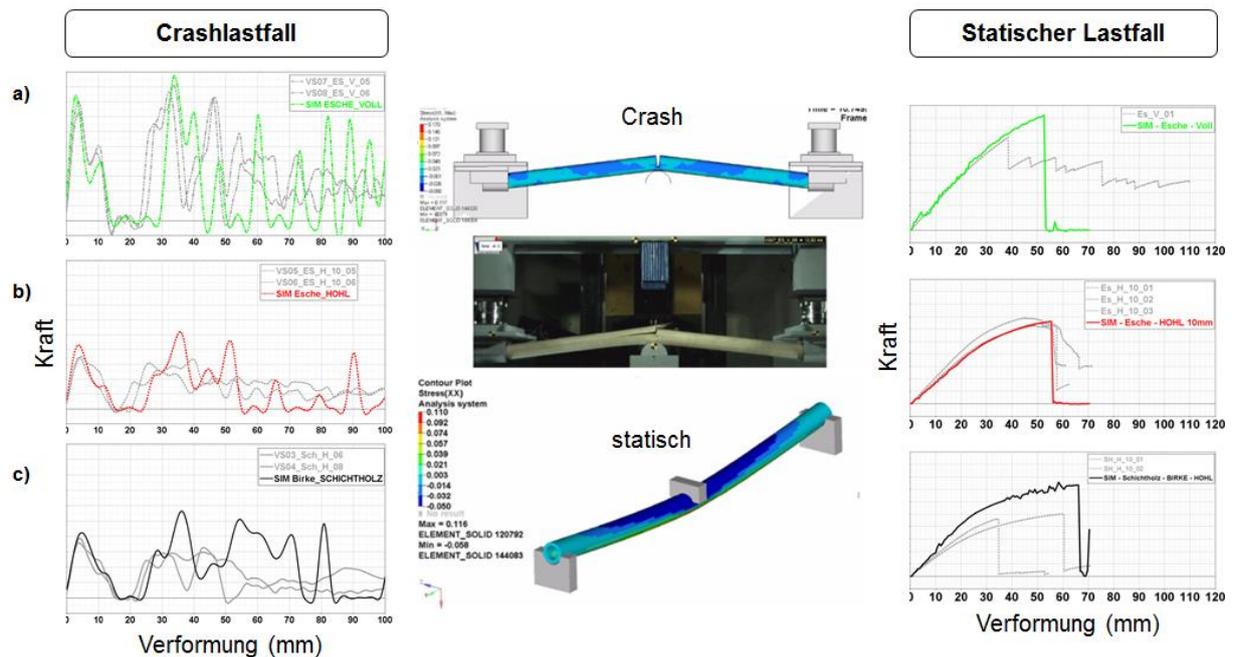


Abb. 1-6: Vergleich der Kraft-Weg-Kurven im Crashversuch (li) und im quasistatischen Biegeversuch (re) von unterschiedlichen Armaturenrägern (oben Esche voll = grün, Esche = Rohrquerschnitt 10 mm Wandstärke = rot, unten Birke-Schichtholz = grau). In der Mitte sind von oben nach unten die Crashsimulation, der reale Crashversuch und die Simulation des quasistatischen Biegeversuchs dargestellt.

Aufgrund des veränderten Bruchverhaltens von Holz im Vergleich zu Metallen und Kunststoffen wurde eine numerisch stabile Integration von Holz in eine Gesamtfahrzeugsimulation von Experten mehrfach in Frage gestellt. Daher wurde das FE Holzmodell des Armaturenrägers in das CULT-Gesamtfahrzeugmodell integriert und Standard-Crashsimulationen durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Gesamtfahrzeugsimulation durch die Integration der Holzverbundbauteile nicht negativ unter den Gesichtspunkten Stabilität und Rechenzeit beeinflusst wird.

Im Rahmen der Studie wurde anhand der aufgezeigten Möglichkeiten für Holzverbundwerkstoffe im Crash ebenfalls die Wirtschaftlichkeit der Holz-Demonstratorbauteile grob abgeschätzt. Auf Basis der im Labor hergestellten Bauteile wurde ein Arbeitsablauf mit Experten aus der Holzindustrie für eine industrielle Fertigung festgelegt. Für alle drei Holz-Demonstratorbauteile lagen die Kosten dabei im Bereich der kalkulierten Herstellkosten für das Konzeptfahrzeug CULT. Die Integration von Holzverbundwerkstoffen im Fahrzeugbau

konnte somit sowohl in der strukturell funktionalen Beurteilung als auch in einer wirtschaftlichen Bewertung plausibel dargestellt werden und weist ein hohes Potential für Leichtbaukomponenten im Fahrzeugbau auf.

Schlussfolgerung und Ausblick

Mit der Studie konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass Holz und Holzverbundwerkstoffe auch in sehr komplexen Baustrukturen hervorragend mittels FE Modellen im Crash simuliert werden können. Einschränkungen für die Simulation, auch im Crashfall, konnten ausgeschlossen werden. Bei den Simulationen wurde bislang der Klebstoff als Materialkomponente nicht mitberücksichtigt. Einzelne Experimente an fortführenden Untersuchungen zeigen, dass sich damit eine Verbesserung der Abbildung des realen Bauteilverhaltens durch die Simulation erzielen lässt.

Das beteiligte Projektkonsortium ist mittlerweile auf eine Anzahl von 17 Partnern aus der industriellen und wissenschaftlichen Fahrzeug- und Holzbranche angewachsen. Im Rahmen des in Österreich geförderten Projekts WoodC.A.R. (Wood Computer Aided Research, 5 Mio. EUR Budget, 4 Jahre Projektlaufzeit; nähere Infos unter www.woodcar.eu) wird nun im Projektkonsortium an der Realisierung von Leichtbaukomponenten aus Holz in der Fahrzeugindustrie weiter intensiv gearbeitet, was auch die Implementierung eines entsprechenden Produktentwicklungsprozesses umfasst. Ziel dabei ist es, mit ausgewählten Anwendungsfällen aus realen Fahrzeugen die mögliche Erweiterung eines Materialmix in Richtung Holzverbundwerkstoffe für den umfassenden Fahrzeug- und Produktentwicklungsprozess umzusetzen. Dabei wird neuen und innovativen Holzwerkstofflösungen, Fertigungs- und Verbindungstechniken sowie virtuellen Entwicklungsmethoden eine besondere Bedeutung zukommen. Mit den dargestellten Methoden und dem erarbeiteten Know-how wird es gelingen, Holzverbundwerkstoffe erfolgreich in Konstruktionen im Sinne des Multi-Material-Leichtbaus zu integrieren. **Abb. I-** zeigt ein 3D Modell eines elektrisch betriebenen Schneefahrzeugs der Firma MATTRO, bei dem wesentliche mechanisch beanspruchte Tragstrukturen durch Holzverbundwerkstoffe unter dem Motto „der richtige Werkstoff am richtigen Ort“ mit überlegenen Gesamteigenschaften realisiert werden sollen. Derzeit erfolgt die exakte Bemessung der Holzbauteile mittels Computer Aided Engineering.



Abb. I-7: Elektrisch betriebenes Schneefahrzeug Ardener der Fa. MATTRO mit Tragstrukturen aus Holzverbundwerkstoffen (3D Ansicht).

Quellen

Ahlers M (2012) Leichtbaustrategie für die Elektromobilität bei BMW. Vortrag: 2. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Stuttgart, 10.07.2012.

Bernhardt R (2013) Innovative Leichtbaukonzepte Multimaterialdesign – Der richtige Werkstoff am richtigen Ort im richtigen Fahrzeug. Vortrag: 3. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Wolfsburg, 03.07.2013.

Böhm S, Alsmann M, Kohl D, Wicke T (2013) Holz in der Automobilen Karosserie. Bayern Innovativ Kooperationsforum: Holz als neuer Werkstoff – Innovationen mit holzbasierten Materialien. Salzstadel Regensburg 2013.

Böhm S, Kohl D (2014) Holz als technischer Werkstoff im strukturellen Fahrzeugbau. BMBF Technologiegespräch "Neue Werkstoffe und Multimaterialbauweisen für innovative Leichtbauanwendungen". Dresden, November 2014.

Coquel M (2014) Fiber-Patch-Preforming [FPP] Optimised CFRP design and efficient production, Vortrag: Innovationstag Composite Simulation. CFK-Valley Stade, 15.05.2014.

De Oto L (2015) Lightweight design of body structures and panels at Automobili Lamborghini. Vortrag: 5. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Wien, 07.07.2015.

DIN 52 185 (1976) Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser.

DIN 52 186 (1978) Prüfung von Holz – Biegeversuch.

DIN 52 188 (1979) Prüfung von Holz – Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser.

DIN 52 189 (1981) Prüfung von Holz – Schlagbiegeversuch – Bestimmung der Bruchschlagarbeit.

DIN 52 192 (1979) Prüfung von Holz – Druckversuch quer zur Faserrichtung.

Dufloy J.R, Deng Y, Van Acker K, Dewulf W (2012) Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle assessment-based study. MRS Bull 2012. 37(4): 374-382.

Faruk O, Bledzki AK, Fink H-P, Sain M (2014) Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. Macromolecular Materials and Engineering, 299: 9-26.

For^stschritt (<http://www.tff-kassel.de/forschung/projekte/forstschritt/>).

Friedrich EH (2013) Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. 1. Auflage, 2013, Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-1467-8, ISBN 978-3-8348-2110-2 (eBook).

Grabner M (2017) WerkHolz. Eigenschaften und historische Nutzung 60 mitteleuropäischer Baum- und Straucharten. Verlag Kessel. ISBN: 978-3-945941-24-9.

Hagemann SH, Hänßler W, Rauscher S (2012) Innovativer Leichtbau im Nutzfahrzeug. Vortrag: 5. Grazer Nutzfahrzeugworkshop. Graz, 11.05.2012.

Hambrecht T, Müller S (2015) Multi material Mix high production volume – The new Audi Longitudinal Platform (MLBevo) of the Q7 body structure. Vortrag: 5. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Wien, 08.07.2015.

HAMMER (<http://www.projekt-hammer.de/>).

Herbeck L, Lang M (2012) Die Industrialisierung der Composites-Produktion. Vortrag: 2. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Stuttgart, 10.07.2012.

Kandler G, Füssl J, Eberhardsteiner J (2014a) Stochastic finite element approaches for wood-based products: theoretical framework and review of methods. Wood Sci Technol. DOI 10.1007/s00226-015-0737-5.

Klein A, Bockhorn O, Mayer K, Grabner M (2016) Central European wood species: characterisation using old knowledge. Journal of Wood Science. DOI: 10.1007/s10086-015-1534-3.

Kohl D, Böhm S (2014) Holzbasierte Multimaterialsysteme für den Einsatz im automobilen Rohbau DVS-Berichte Band 303, ISBN 978-3-87155-575-6, DVS Media GmbH Düsseldorf, 2014.

Kohl D Flohr T, Böhm S (2014) Adhesively Bonded Wood-Based Multi-Material Systems as a Sustainable Material for Technical Applications. 37th Annual Meeting of the Adhesion Society. San Diego, USA, February 23-26 2014.

Kohl D, Wicke T, Alsmann M, Böhm S (2014) Holz in der modernen automobilen Karosserie. Holztechnologie Band 55 (2014) Heft 6: 44-49, IHD, Dresden, 2014.

Kohl D, Böhm S (2015) Holz als Chance für den strukturellen Leichtbau. Vortrag: 5. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Wien, 07.07.2015.

Kollmann FFP, Côté Jr. WA (1968) Principles of Wood Science and Technology - Solid Wood. ISBN: 978-3-642-87930-2.

Lehold J (2012) Leichtbau und Nachhaltigkeit – Ergänzung oder Widerspruch? Vortrag: 2. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Stuttgart.

Lukacevic M, Füssl J, Lampert R (2015) Failure mechanisms of clear wood identified at wood cell level by an approach based on the extended finite element method. Engineering Fracture Mechanics. 144: 158-175.

Müller A (2012) Leichtbaustrategien für den Automobilbau. Vortrag: 2. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Stuttgart, 11.07.2012.

Müller U, Ringhofer A, Brandner R, Schickhofer G (2015) Homogeneous shear stress field of wood in an Arcan shear test configuration measured by means of electronic

speckle pattern interferometry: description of the test setup. *Wood Science Technology*. 49(6): 1123-1136.

Niemz P (1993) *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co.

ÖNORM EN 408 (2001) *Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brett-schichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*.

ÖNORM EN 302-1 *Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit*.

Shah DU (2013) *Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review*. *Journal of Materials Science*. 48: 6083-6107.

Schelper J, Kohl D, Böhm S (2014) *Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau*. 14. Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 18.-19. Februar 2014, Frankfurt.

Tabiei A, Wu J (2000) *Three-dimensional nonlinear orthotropic finite element material model for wood*. *Composite Structures*. 50: 143-149.

Tesch F (2015) *Leichtbau und Hochelektrifizierung: Herausforderungen und Handlungsfelder*. Vortrag: 5. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Wien, 08.07.2015.