

T. Jost, U. Müller, F. Feist

Holzverbundwerkstoffe im Automobilbau der Zukunft? – Grundvoraussetzung: Crashsimulation von Holzkomponenten

Wood Composites for Future Automotive Engineering? – Basic Requirement: Crash Simulation of Wood-Based Components

Inhalt: Die aktuellen Debatten zur Verbesserung der CO₂-Bilanz von Fahrzeugkonzepten der Zukunft verlangen nach neuen Überlegungen zum Materialmix. Dementsprechend wird intensiv nach neuen Werkstoffen und Werkstoffkombinationen gesucht. Moderne Holzverbundwerkstoffe besitzen hervorragende mechanische Eigenschaften bei vergleichbar geringer Dichte. Richtig eingesetzt, sind Holzwerkstoffe kompetitiv zu faserverstärkten Kunststoffen und Metallen. Bis dato konnten Materialdaten und Materialarten von Holz nicht für die Simulation von Crashbelastungen zur Verfügung gestellt werden. Im Zuge einer durchgeführten Studie konnte das Potential der expliziten Finiten Elemente (FE)-Berechnung von Holzverbundwerkstoffen unter statischer sowie Crashbelastung mit ausreichender Genauigkeit bis zum initialen Werkstoff- bzw. Bauteilversagen nachgewiesen und notwendige zukünftige Entwicklungsschwerpunkte aufgezeigt werden.

Abstract: Fuel reduction and CO₂-balance is heavily discussed in automotive engineering. Improvements of the ecologic footprint require innovative vehicle concepts and involvement of bio-based materials. Novel materials, material combinations and composites are urgently needed. Wood provides high stiffness, strength, excellent damping, high resistance against fatigue and a very low density paired with low material costs. Properly applied, modern wood composites are competitive to metals and fibre-reinforced materials. However, the application of wood and wood composites in automotive engineering requires precise and reliable material data, e.g. for a very first material selection and later in numerical crash simulations. A feasibility study was performed, that identifies the potential of explicit FE simulation of wood composites under static and crash load condition. Consequently, future research tasks for enhanced wood related FE simulation were derived.

1 Motivation

In der Automobilindustrie wird intensiv nach neuen Leichtbaumaterialien gesucht (zum Beispiel [1, 2]). Im modernen Fahrzeugbau wird eine steigende Menge an Verbundwerkstoffen, wie Glasfaser- und Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe, sowie auch bereits geringe Mengen an Naturfaserverbundwerkstoffen verbaut (zum Beispiel [3, 4, 5, 6, 7]). Diese Werkstoffe sind allerdings schwer zu verarbeiten und führen aufgrund ihres Materialpreises und des erhöhten Fertigungsaufwands zu einer Erhöhung der Produktkosten. Holz ist ein Leichtbaumaterial mit exzellenten mechanischen Eigenschaften. Die beachtliche mechanische Leistungsfähigkeit von Holz bzw. Holzwerk-

stoffen ist Inhalt zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen. Es wird zum Beispiel gezeigt, dass bei Holzarten E-Moduln weit über 20 GPa erreichbar sind [8]. Die mechanischen Eigenschaften von Holz werden dabei primär durch die in der Zellwand eingelagerte Cellulose beeinflusst [9]. Holz ist ein kapillar-poröser Stoff. Unter der Voraussetzung der Beseitigung der Zellhohlräume (Lumen) kann Holz Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften erreichen, die mit modernen Metall- und faserverstärkten Kunststoffen konkurrieren können [10]. In Tabelle 1 sind grundlegende mechanische Standardkennwerte für ausgewählte und für die Studie relevante Holzarten dargestellt. In Bild 1 wird Massivholz mit den Standard-Karosseriewerkstoffen

Stahl und Aluminium im Vergleich der spezifischen Festigkeit über spezifisches E-Modul dargestellt.

In der Vergangenheit wurde Holz als Konstruktionsmaterial im Maschinen-, Fahrzeug- und Flugzeugbau breit eingesetzt. Die Hochblüte des Einsatzes für technische Zwecke hat Holz in der Zeit der 30er bis 50er Jahre des letzten Jahrhunderts erlebt. 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 [11, 12]. In den letzten Jahren wurde der mögliche Einsatz von Holz in der Automobilindustrie intensiv diskutiert. Einige OEMs haben bereits Sondierungsprojekte bzw. erste

Holzart		Rohdichte [g/cm³]	Biege-E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit längs [N/mm²]	Druckfestigkeit längs [N/mm²]	Biegefestigkeit [N/mm²]
Laubholz	Birke	0,62	14,9	163,9	60,7	112,3
	Buche	0,73	15,3	149,0	65,9	139,2
	Esche	0,75	15,5	149,9	70,9	155,9
Nadelholz	Fichte	0,42	12,4	111,9	41,5	83,5
	Kiefer	0,65	18,9	180,8	59,3	150,8

Tabelle 1
Mechanische Kennwerte für Massivholz ausgewählter Holzarten (an der BOKU gemessene Daten)

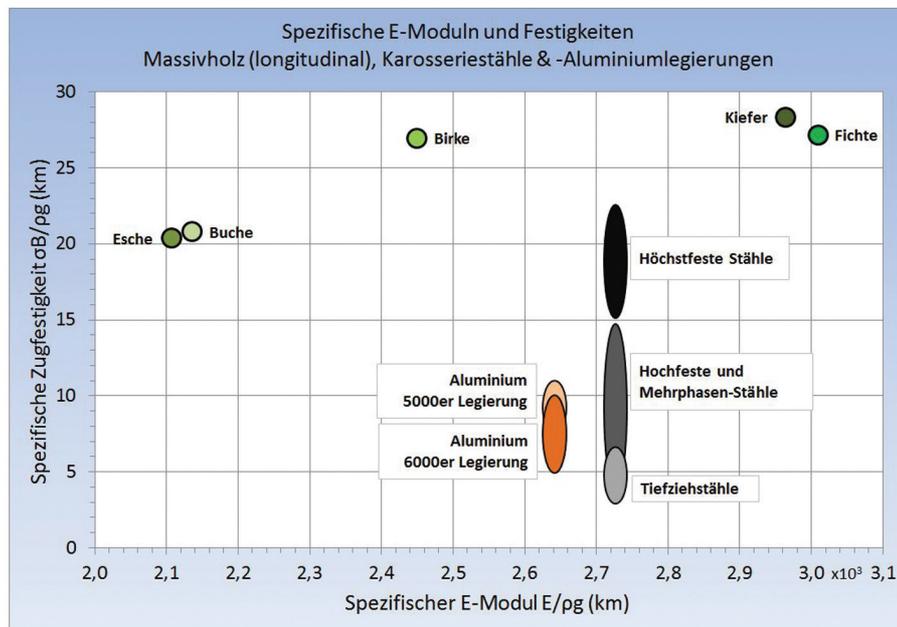


Bild 1
Spezifische E-Moduln und Festigkeit von Holz und Standard-Karosseriewerkstoffen

Forschungsprojekte in diese Richtung initiiert (zum Beispiel Projekt Hammer und Folgeprojekt For(s)tschritt in Kooperation mit Volkswagen AG [13, 14, 15]. Der Entwicklungsprozess, Konstruktion und Engineering ist in der Automobilindustrie direkt mit Simulationsprogrammen verknüpft. Die Simulationsfähigkeit von verbauten Werkstoffen stellt heute den Stand der Technik dar und ist damit eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz im Automobilbau. Neben Werkstoffmodellen mit geeigneten mathematischen Ansätzen ist die Grundlage dieser Simulationsprogramme eine entsprechende Datenbank mit detaillierten Werkstoffkennwerten. Diese

sind für die derzeit eingesetzten Standardwerkstoffe im Fahrzeug- bzw. Karosseriebau wie Stahl, Aluminium, Kunststoffe, etc. bekannt und verfügbar. Jedoch gibt es keine Werkstoffdaten, die die Materialeigenschaften von Holz und Holzverbundwerkstoffen für den Einsatzbereich in Fahrzeugstrukturen (vor allem unter Crashbelastung) hinreichend genau beschreiben. Eine Überprüfung, ob das Verhalten von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen mit den geforderten Güte mittels Simulationsprogrammen und vorhandenen Werkstoffkennwerten berechnet werden kann, war daher Inhalt der hier vorgestellten Studie.

2 Bisherige FE-Simulation von Holz

In den letzten zwei Jahrzehnten wurde die Finite Element Methode (FEM) zur Bauteilberechnung bzw. -auslegung auch in der Holztechnologiebranche verstärkt angewandt (zum Beispiel [16, 17, 18]). Insbesondere im Ingenieurholzbau gehören diese Methoden heute zum Stand der Technik. Allerdings umfassen Materialsimulationen vorrangig Fichtennadelholz, das aufgrund der breiten Anwendung im Bauwesen hinsichtlich der mechanischen Kennwerte hervorragend untersucht ist. Insbesondere für Laubholz stehen kaum verlässliche mechanische Kennwerte zur Verfügung. Aufgrund fertigungstechnischer und material-

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Jost
Head of Structural Safety
Virtual Vehicle
Inffeldgasse 21/A, 8010 Graz/A
Tel.: +43 (0) 3 16 8 73-90 75
E-Mail: thomas.jost@v2c2.at

Priv.-Doz. Dr. Ulrich Müller
Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe / Universität für Bodenkultur Wien
Konrad-Lorenzstraße 24, 3430 Tulln/A
Tel.: +43 (1) 4 76 54-42 52
E-Mail: ulrich.mueller@boku.ac.at

Dipl.-Ing. Dr. Florian Feist
Vehicle Safety Institute (VSI)
TU-Graz
Inffeldgasse 23/1, 8010 Graz/A
Tel.: +43 (0) 3 16 8 73 3 03 12
E-Mail: florian.feist@tugraz.at

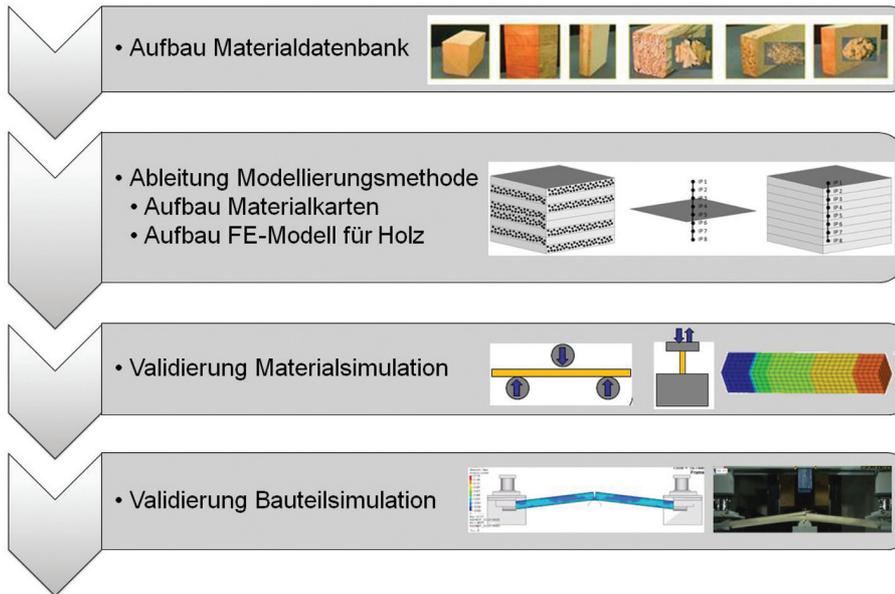


Bild 2
Vorgehensweise zur Erstellung einer Modellierungsmethode für Holz im Crash

Gemessene Kennwerte		Literatur-Kennwerte
Kennwert	Versuch	
Dichte	Messung an Druckprobe	Querkontraktionszahlen
E-Modul (longitudinal, transversal)	Zug, Querdruck	E-Modul (tangential)
Schubmodul (GLT)	3- & 4-Punkt-Biegung	Schubmodul (GTR, GRL)
Zugfestigkeit (longitudinal)	Zug	Zugfestigkeit (transversal)
Bruchdehnung (longitudinal)	Zug	
Druckfestigkeit (longitudinal, transversal)	Druck, Querdruck	Schubfestigkeit

Tabelle 2
Übersicht der Holz-Kennwertermittlung aus durchgeführten Versuchen und aus der Literatur [12, 19, 20]

technischer Gründe erscheint nach heutigem Stand des Wissens vorrangig fehlerfreies Laubholz als Rohstoff für technische Anwendungen im Fahrzeugbereich geeignet zu sein. Insbesondere sogenannte zerstreut-porige Laubholzarten (zum Beispiel Birke, Buche, Pappel) verfügen über einen homogenen Zellaufbau mit geringen Dichteschwankungen. Dieser homogene Aufbau erleichtert die mechanische Bearbeitbarkeit und Umformungsverfahren. Entgegen baustatischer Anwendungen verlangt die Nutzung von Holzverbundwerkstoffen im Fahrzeugbereich auch dynamische (inkl. Crash) und besondere fertigungstechnische

Beanspruchungen des Materials. Insbesondere Crashsimulationen wurden bislang noch nicht durchgeführt. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie wurde das Potential der FE-Crashberechnung von Holz entsprechend der in Bild 2 dargestellten klassischen Vorgehensweise ermittelt.

3 Aufbau einer Materialdatenbank

Um die notwendigen Kenndaten für eine Materialsimulation von Holzverbundwerkstoffen und komplexen Holzstrukturen zu schaffen, wurden quasistatische Norm-Versuche mit

kleinen fehlerfreien Proben aus Esche, Birke, Rotbuche und Kiefer durchgeführt. Weitere Versuche wurden mit Birken- und Buchensperrhölzern, mit Lagenhölzern sowie mit mitteldichter Faserplatte durchgeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach gültigen Holznormen (DIN 52188, DIN 52185, DIN 52192, DIN 52186, DIN 52189, EN 408, EN 302). Erhobene Daten wurden mit einer breit angelegten Literaturstudie zum mechanischen Verhalten der ausgewählten Materialien verglichen und hinsichtlich einiger Materialkennwerte (zum Beispiel Querdehnungszahlen und E-Modul in Querrichtung) ergänzt. In Tabelle 2 werden die im Zuge der durchgeführten Versuche ermittelten sowie die durch die Literatur ergänzten Kennwertgrößen aufgelistet. Die hier angegebenen Materialrichtungen sind im Bild 3 erläuternd dargestellt. Die Kennwerte wurden in weiterer Folge für die Erstellung der Materialkarten für die explizite FE-Simulation herangezogen. Hier muss erwähnt werden, dass die im Rahmen der vorliegenden Studie ermittelten detaillierten Kennwerte in Tabelle 2 aus rechtlichen Gründen nicht vorgelegt werden dürfen.

4 Modellierungsmethode Holz im Crash

Die Modellierungsmethode für Holz im Crash muss den grundlegenden Anforderungen des virtuellen Fahrzeugentwicklungsprozesses genügen. Das heißt, dass die Methode eine virtuelle Auslegung des mechanischen Eigenschaftsprofils von Bauteilen bestehend aus Holzverbundwerkstoffen zulassen muss. Dementsprechend wurde im Rahmen der Studie die in

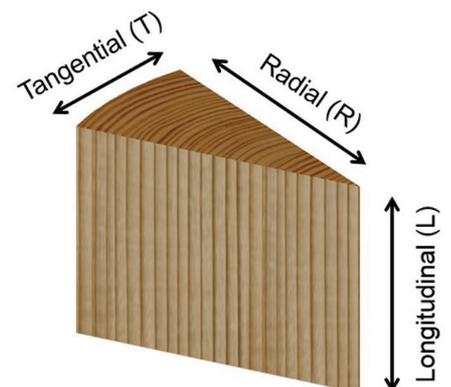


Bild 3
Definition der charakteristischen Materialrichtungen für Holz

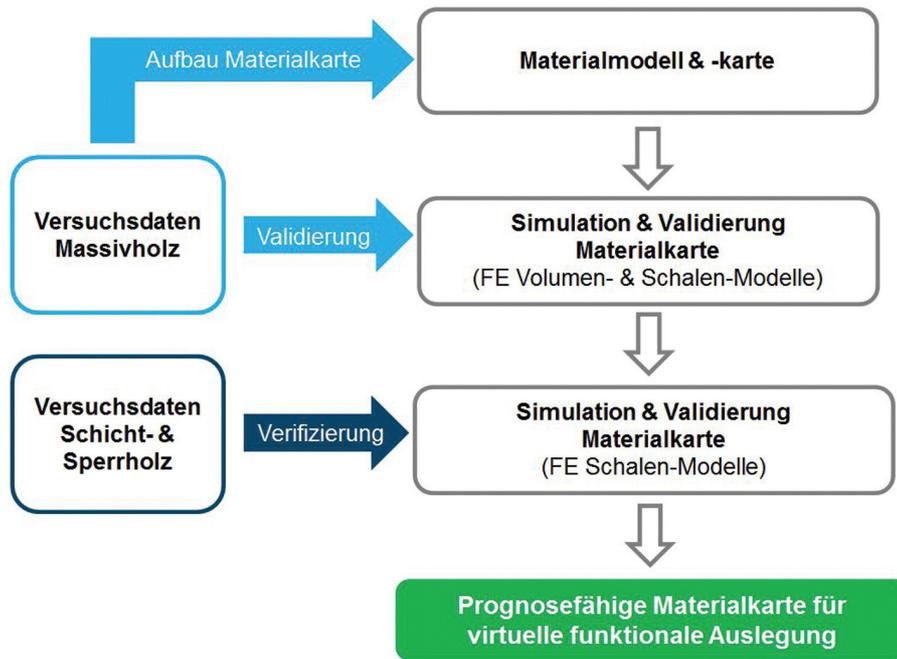


Bild 4
Vorgehensweise zur Materialkartenerstellung für Holzverbundwerkstoffe

Bild 4 dargestellte Vorgehensweise zur Materialkartenerstellung von Holzverbundwerkstoffen unter Anwendung der in der Automobilbranche weit verbreiteten expliziten FE-Software LS-Dyna [21] verfolgt. Anhand einer Basis-Materialcharakterisierung von Massivholz wurde eine Materialkarte, welche für Volumen- und Schalenelemente verwendet werden kann, aufgebaut und validiert. Darauf aufbauend wurden Schicht- und Sperrhölzer mit der identen Materialkarte berechnet. Stimmen hier die Ergebnisse zwischen Simulation und Versuch gut überein, gilt die Methode im letzten Schritt als verifiziert. Folglich steht grundsätzlich eine qualitative Modellierungsmethode für die virtuelle Potentialanalyse von Holzverbundbauteilen im Crashlastfall zur Verfügung. Im Hinblick auf den FE-Modellaufbau der Schicht- und Sperrhölzer muss besonders hervorgehoben werden, dass im Zuge der durchgeführten Studie ausschließlich die grundlegende Berechenbarkeit des Grundwerkstoffs Holz über die Proportionalitätsgrenze hinaus betrachtet und evaluiert wurde. Dementsprechend wurde die Schichtverklebung der Schicht- und Sperrhölzer im FE-Modell nicht berücksichtigt. Der Modellaufbau bildet somit einen idealen Schichtverbund ohne Klebeverbindung mit Schalenelementen ab. Dieser wird in LS-Dyna mit der Funk-

tion „*Part_Composite“ aufgebaut. Hierbei werden den Schalenelementen über die Dicke jeweils eigene Schichteigenschaften (Dicke, Material sowie Materialorientierung) zugewiesen.

Hinsichtlich der Materialsimulation wurde das Ziel verfolgt, Holzverbundwerkstoffe mit Standardberechnungsmethoden bzw. -materialmodellen abbilden zu können. Gleichzeitig wurde, wie oben bereits erwähnt, auf einen möglichst einfach handzuhabenden Modellaufbau Wert gelegt. Entsprechend wurde auf das in LS-Dyna für Faserverbundwerkstoffe zur Verfügung stehende Materialmodell MAT_054 (MAT_Enhanced_Composite_Damage) zurückgegriffen (genaue Beschreibung siehe [22]). Bei Mat_054 handelt es sich um ein orthotropes Materialmodell mit einer asymmetrischen Definitionsmöglichkeit der Festigkeit und des Versagens unter Zug- und Druckbelastung (siehe Bild 5). Das Materialmodell verwendet ein Versagensmodell nach Chang/Chang. Dabei handelt es sich um ein spannungsbasierendes Versagenskriterium, welches zwischen vier Versagensmoden unterscheiden kann, nämlich Versagen der Matrix bzw. der Faser, jeweils auf Zug und Druck. Bei Verletzung des Matrix-Druck-Versagenskriteriums wird zum Beispiel der Tangenten-E-Modul quer zur Faser auf

null gesetzt. Der Tangenten-E-Modul in Faser-Richtung bleibt dadurch unberührt. Das heißt das Material verhält sich nach der Verletzung dieses Kriteriums ideal-plastisch, sofern von einer Beschreibung des weiteren Verhaltens nach dem Versagen abgesehen wird. Die vier Einzelversagenskriterien sind eine Funktion der Zug- und Druckfestigkeiten in Faserrichtung und quer dazu, sowie der Querschubfestigkeit. Beim Faser-Zug-Versagen kann noch ein Schubterm, gewichtet über den Parameter ‚beta‘, berücksichtigt werden. Das Kriterium kann über Einstellung von weiteren Parametern zu einem reinen Maximalspannungskriterium oder Hashin-Kriterium modifiziert werden. Daneben können im Modell noch dehnungsbasierte Versagenskriterien Faser-Zug (DFAILT), Faser-Druck (DFAILC) und Matrix-Zug/Druck (DFAILM) definiert werden. Hierbei kann im Wesentlichen die Funktion der dehnungsbasierten und spannungsbasierten Versagenskriterien unterschieden werden: Eine Verletzung der spannungsbasierenden Kriterien führt zu einem Modus-abhängigen Versagen der betroffenen Lage im FE-Element. Eine Verletzung der dehnungsbasierenden Kriterien führt jedoch zu einem vollständigen Löschen der betroffenen Lage im Element. Erst wenn alle Einzellagen gelöscht wurden, wird auch das FE-Element gelöscht. Bleibt eine Definition von einem dehnungsbasierten Kriterium aus, so erfolgt das Löschen der Lage im FE-Element schon alleine durch die Verletzung eines spannungsbasierenden Kriteriums. In der vorliegenden Studie wurde für die Druckrichtung von einem ideal-plastischen Verhalten nach der Verletzung des Chang/Chang Kriteriums ausgegangen. Über den Parameter ‚YFAC‘ kann die Druckfestigkeit in Faserrichtung skaliert werden, wenn es zu einem Druck-Versagen der Matrix kommt. Zusammenfassend wird angemerkt, dass das Materialmodell hinsichtlich der mechanischen Kennwerte für das elastische Verhalten und Versagen mit einfach zu ermittelten Kennwerten aufgebaut werden kann, sowie für Volumen- und Schalenelementmodellierung zur Verfügung steht. Dies reduziert den Aufwand der Materialmodellierung wesentlich und stellt dadurch einen elementaren Vorteil des verwendeten Materialmodells dar.

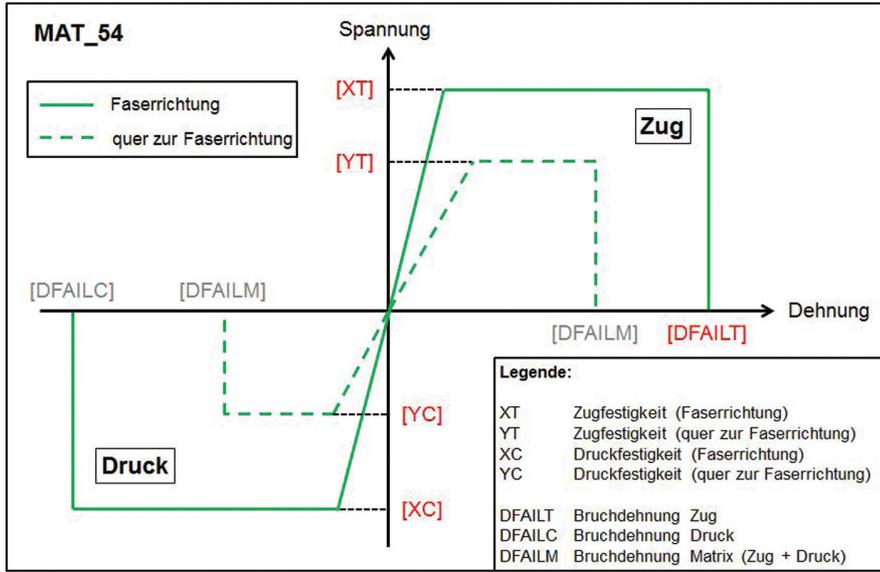


Bild 5
Schematische Beschreibung des gewählten Materialmodells mit asymmetrischem Versagensverhalten für Zug- und Druckbelastung

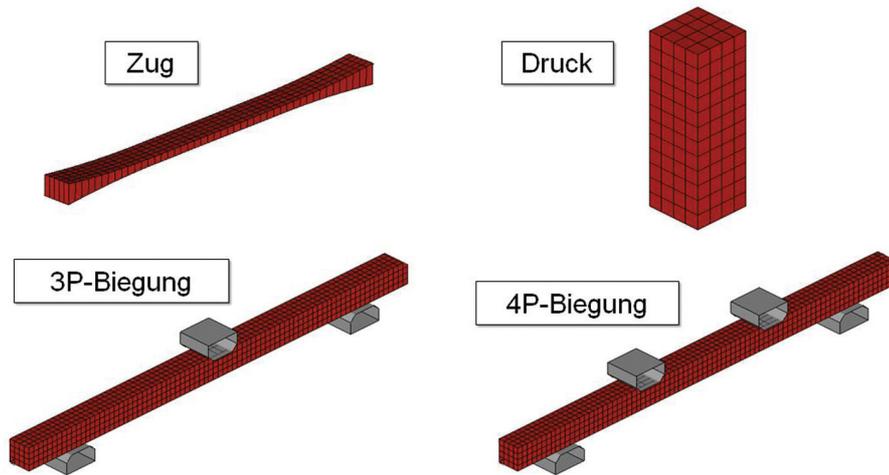


Bild 6
FE-Modelle der Versuchslastfälle Zug, Druck, 3- und 4-Punkt-Biegung

5 Validierung der Materialsimulation

Auf Basis des oben beschriebenen Materialmodells MAT_054 wurden in LS-Dyna Materialkarten von Massivholz für Kiefer, Rotbuche, Esche und Birke für die FE-Simulation anhand von Kleinproben-Versuchsdaten für Zug, Druck und Biegung aufgebaut (aus rechtlichen Gründen dürfen die Materialkarten hier nicht vorgelegt werden). Dabei wurden die jeweiligen Kennwerte direkt aus dem Mittelwert einer Versuchsreihe mit mehreren Wiederholversuchen (in der Regel im Bereich drei bis sieben Versuche) bestimmt. Im Bild 6 sind die FE-Modelle für die Lastfälle Zug, Druck, 3- und 4-Punkt-

Biegung dargestellt. Bei den Zug- und Druck-FE-Modellen wurde nur der translatorische Freiheitsgrad in Belastungsrichtung der untersten Knoten gesperrt, um die Querdehnung im restlichen Körper nicht zu behindern. Die Belastung erfolgte wegbasiert und wurde über die LS-Dyna-Funktion „boundary prescribed motion“ aufgebracht. Bei den FE-Modellen für den 3- und 4-Punkt-Biegefall wurden der Impaktor und die Auflager als Starrkörper modelliert. Die Auflager wurden als Festlager definiert und der Impaktor mit ausschließlicher Bewegungsmöglichkeit in z-Richtung versehen. In allen FE-Modellen wurde in den Kontaktflächen eine automatische, symmetrische Kontaktdefinition „con-

tact automatic surface to surface“ verwendet. Die quasi-statisch durchgeführten Versuche wurden im expliziten Code mit einer wesentlich höheren Belastungsgeschwindigkeit gerechnet. Da jedoch noch keine Dehnrateneffekte im Materialmodell hinterlegt waren, entsprach diese Art der Berechnung dem quasi-statischen Versuch. Auf eine globale Dämpfung wurde verzichtet, da es zu keinem signifikanten Aufschwingen im Betrachtungszeitraum kam. Zusätzlich wurde sichergestellt, dass die kinetische Energie in Relation zur Verformungsenergie $< 0,5\%$ beträgt.

Im Bild 7 wird der Vergleich zwischen Versuch und Simulation der Versuchslastfälle Zug, Druck, Querdruck, 3- und 4-Punkt-Biegung exemplarisch für Birke-Massivholz dargestellt (Simulation in rot, Versuche in grau). Trotz der Vereinfachungen hinsichtlich des Rollschubverhaltens und des Entfestigungsverhaltens zeigt der Vergleich zwischen Simulation und Versuch eine vielversprechende Übereinstimmung. Mittels des gewählten Modellansatzes MAT_054 kann das Grundmaterialverhalten von Massivholz zumindest schon qualitativ simuliert werden. Wie eingangs erwähnt, mussten bei der Materialmodellierung noch vereinfachende Annahmen hinsichtlich der maximalen Werkstoffbeanspruchung sowie des Versagens getroffen werden. Die Materialkarte MAT_054 erlaubt keine direkt getrennte Eingabe der Roll-, Längs-, und Querschubfestigkeit. Diese Vereinfachungen führen unter anderem zu einer nicht korrekten Versagensbeschreibung im Zuge der 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegebelastung. Im konkreten Fall des 4-Punkt-Biegefall wurde der Versuch jedoch im elastischen Bereich abgebrochen. Entsprechend ist kein Vergleich hinsichtlich des Versagens mit der Simulation möglich.

Aufbauend auf den Massivholz-Simulationen wurde die Prognosefähigkeit mit identen Materialkarten für mit Schalenelementen modellierten Schicht- und Sperrhölzern abgesichert. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Modellierungsmethode hinsichtlich der Materialabbildung hinreichend genau für Potentialabschätzungen funktioniert.

6 Aufbau von Holz-Demonstratorbauteilen

Die im Rahmen der Studie entwickelten Holz-Demonstratorbauteile wurden vom Konzeptfahrzeug CULT (Cars Ultra Light Technologies [23]) des Ko-

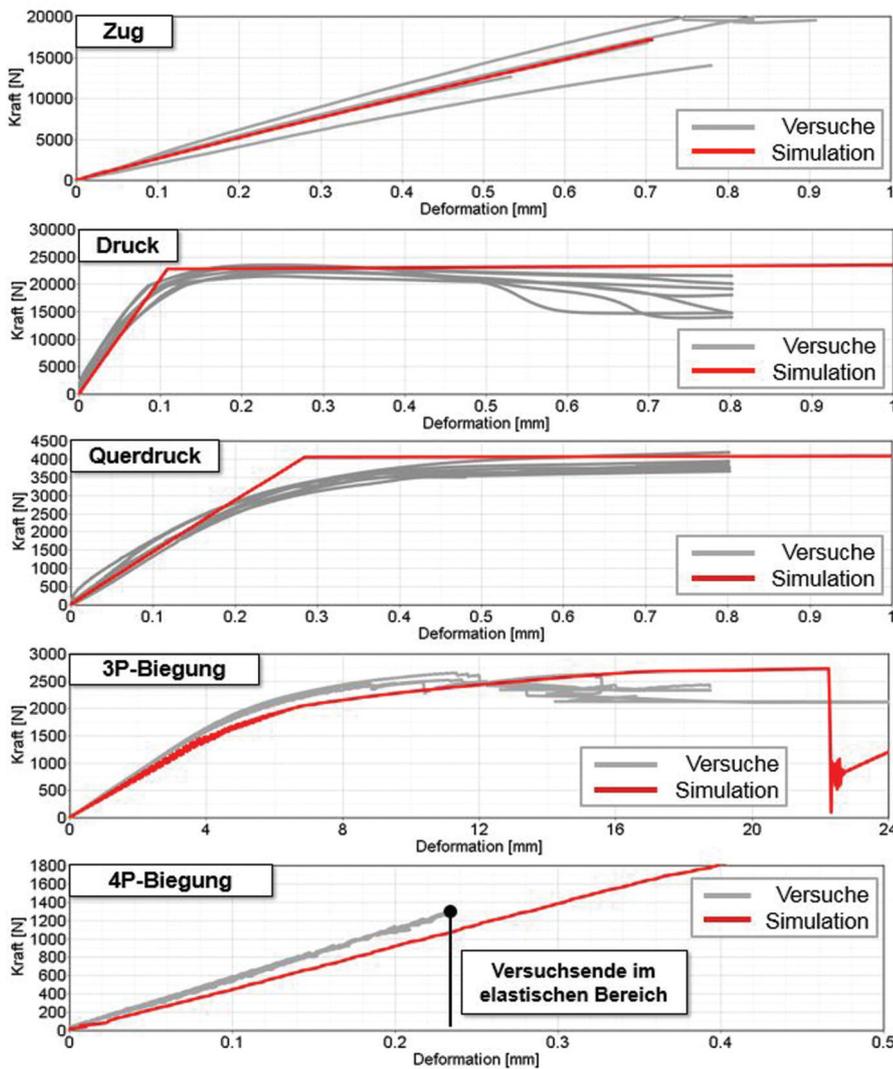


Bild 7
Vergleich der Arbeitslinien für Zug, Druck, Querdruck, 3- und 4 Punkt-Biegung zwischen Simulation (rot) und Versuchen (grau) für Birke Massivholz

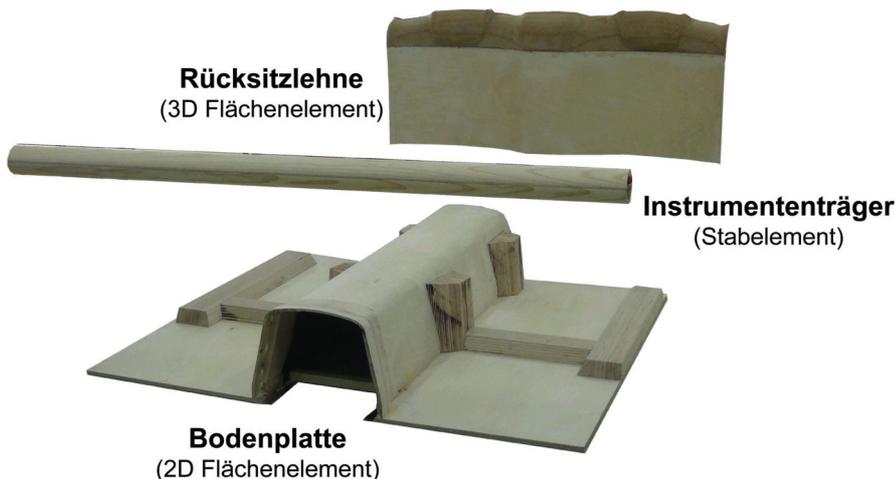


Bild 8
Darstellung der Holz-Demonstratorbauteile

operationspartners Magna Steyr Fahrzeugtechnik (MSF) abgeleitet. Grundsätzlich wurden folgende potentielle Fahrzeugstrukturkomponenten für die Bauteilumsetzung in Holz ausgewählt: Rücksitzlehne, Instrumententräger und

Unterboden mit Zentraltunnel (siehe Bild 8). Diese Bauteile wurden exemplarisch nach den originalen Dimensionen und vorgegebenen Geometrien in Holzverbundbauweise aufgebaut. Die Zielsetzung dabei war es nicht, gegenüber

den bestehenden Komponenten mit den Holzbauteilen kompetitiv zu sein, sondern die Berechenbarkeit von Holzverbundbauteilen unter Crashbedingungen nachzuweisen. Werkstoff-spezifische Bauteiloptimierungen wurden daher nicht durchgeführt.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Demonstrator-Instrumententräger wurden mit einer Länge von 1250 mm zur Bewertung der Holzkonzepte in den Bauweisen Vollquerschnitt Massivholz, Rohrquerschnitt Massivholz und Rohrquerschnitt Schichtholz hergestellt (Bauteilaußendurchmesser 60 mm sowie Innendurchmesser 40 mm). Bei allen Bauvarianten wurden jeweils zwei Stab- bzw. Rohrhälbschalen zusammengeklebt. Für die Verklebung der Hälbschalen sowie der Schichthölzer wurde der Klebstoff Aerodux 185 eingesetzt.

7 Validierung der Bauteilsimulation unter Crashbedingungen

Zu Beginn der Aktivität musste eine Datenbasis für Holzbauteile im Crash aufgebaut werden. Dazu wurde eigens ein Prüfstands-aufbau konzipiert, mittels FE-Simulation in LS-Dyna ausgelegt und am Institut für Fahrzeugsicherheit der TU-Graz aufgebaut (siehe Bild 9). Im Versuch wurde der Impaktor mit einem Gewicht von 30 kg auf 9 m/s (circa 32 km/h) beschleunigt. Dadurch konnten reale Crashrandbedingungen sichergestellt werden. Hinter den beiden Bauteilauflagerbereichen wurde jeweils die Kraft mittels Kraftmessensoren sowie die Beschleunigung des Impaktors mittels Beschleunigungssensor gemessen. Die Lagerung des Instrumententrägers wurde einer Einspannung mit einem Freiheitsgrad in axialer Richtung gleichgesetzt. Die Verformung und Bewegung des Bauteils und des Impaktors wurde während des Versuchs über drei Hochgeschwindigkeitskameras aufgezeichnet.

Der FE-Modellaufbau insbesondere hinsichtlich der Kontaktdefinitionen erfolgte bei den Prinzipbauteilen gleich wie bei der Simulation der Holz-Kleinproben. Die FE-Modelle der drei Holz-Demonstratorbauteile wurden anhand der entsprechenden Crashversuchsdaten validiert. In Bild 10 wird der Vergleich zwischen Simulation und Versuch am Beispiel des Demonstrator-Instrumententrägers für die Baukonzepte Vollquerschnitt Massivholz,

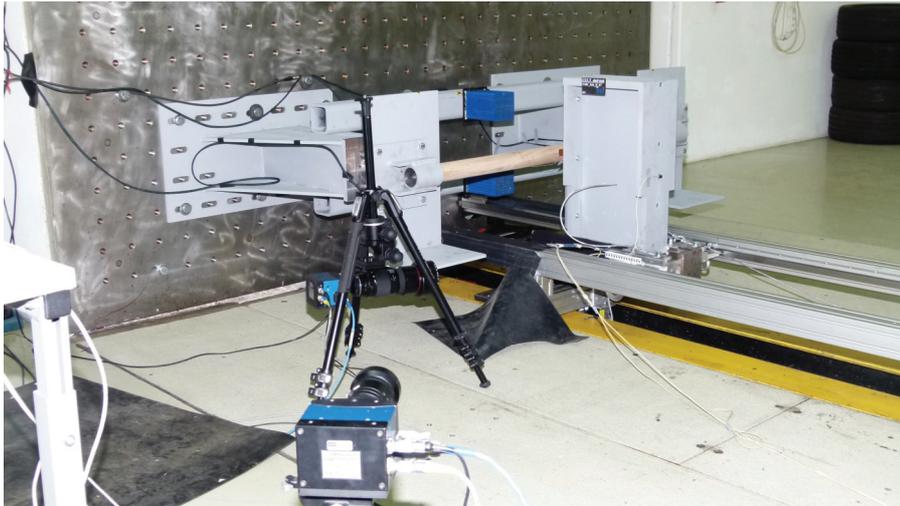


Bild 9
Prüfstands Aufbau für Holz-Crashversuche

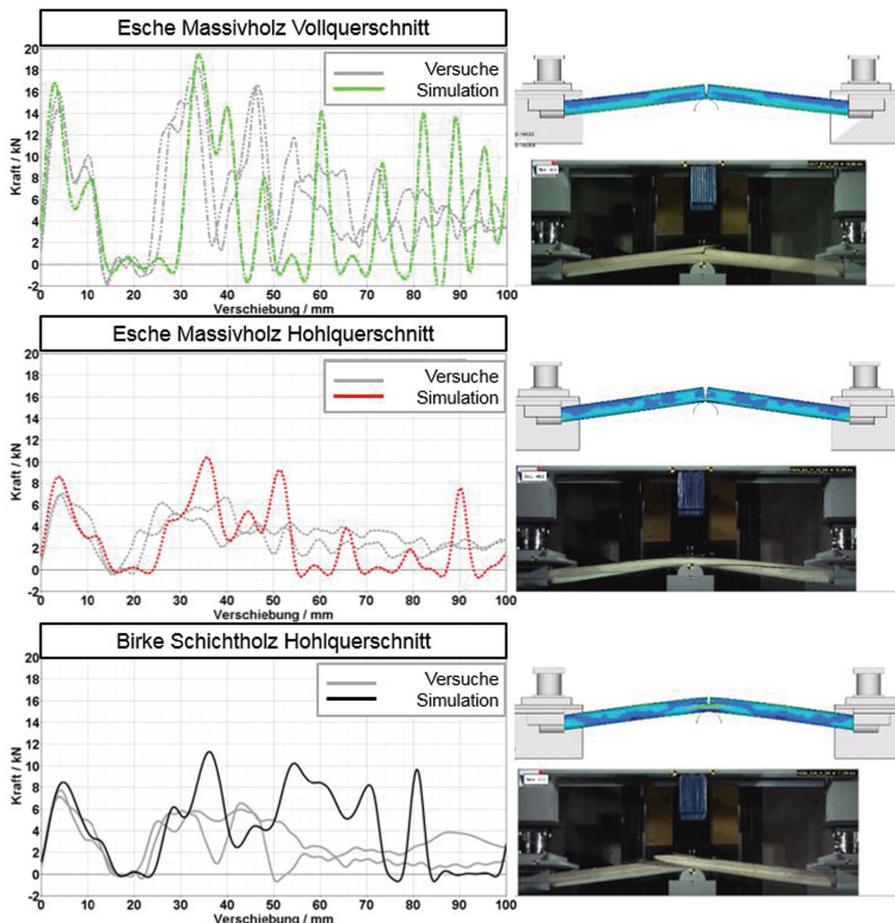


Bild 10
Links: Vergleich Kraft-Weg-Kurven aus Crashlastfall der Instrumententräger-Baukonzepte Vollquerschnitt Massivholz, Rohrquerschnitt Massivholz und Rohrquerschnitt Schichtholz im Versuch (graue Linien) mit Simulation (Esche Vollquerschnitt = grüne Linie, Esche Rohrquerschnitt = rote Linie, Birke-Schichtholz Rohrquerschnitt = schwarze Linie). Rechts: Dazugehöriger Vergleich des initialen Versagensbilds zwischen Versuch und Simulation

Rohrquerschnitt Massivholz und Rohrquerschnitt Schichtholz unter Crashlast 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 eine sehr gute quantitative Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch für den Crashlastfall. Die danach auftretenden Abweichungen in den Messsignalen im Bereich der Entfestigung und im Verlauf der Schädigungsbilder sind durch die oben bei der Materialsimulation beschriebenen Vereinfachungen im FE-Modellaufbau hinsichtlich orthotroper Materialfestigkeiten und -versagen, fehlender Klebermodellierung inklusive Versagen sowie möglicher Dehnrateneffekte begründet. Im Zuge der Studie wurde bewusst aufgrund eines einfachen Modellaufbaus sowie nicht vorhandenen belastbaren Kleberkennwerten auf die Abbildung der Verklebung zwischen den Holzschichten und -komponenten, welche in den Bauteilen bis zu 20% Gewichtsanteil betragen, verzichtet. Nichtsdestotrotz zeigt das mechanische Verhalten der Klebstellen unter Crashlast keinen erkennbaren Einfluss in der Belastungsphase bis zum initialen Bauteilversagen im Vergleich zwischen Simulation und Versuch. Zusätzlich zeigt die fehlende Berücksichtigung von Holz-Dehnrateneffekten in der Simulation keine deutlichen Abweichungen hinsichtlich der Bauteilsteifigkeit in allen drei Baukonzepten. Dementsprechend weisen die FE-Simulationen im Vergleich zu den Crashversuchen der drei Aufbauvarianten des Instrumententrägers eine sehr gute Übereinstimmung in der Phase bis zum initialen Bauteilversagen auf. Weiterführend ist grundsätzlich ein direkter Vergleich zwischen den Anrisspositionen in Simulation und Versuch aufgrund der vereinfachten Materialmodellierung und der individuellen Jahringstruktur zwischen den individuellen Probekörpern nur schwer möglich.

In Bild 11 wird der Vergleich der drei Instrumententräger-Baukonzepte unter statischer Last dargestellt. Im Vergleich zur Crashbelastung spielt der Kleber bei statischer Bauteilbelastung bzgl. der Bauteilsteifigkeit eine dominanter Rolle. Die beiden Massivholzvarianten Voll- und Rohrquerschnitt weisen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch auf. Jedoch wird der Einfluss der fehlenden Kleberabbildung in der Simulation in der Bauvariante Birke Schichtholz im quasistatischen Lastfall (siehe Bild 11) im Vergleich zum Versuch sehr verdeutlicht. Der Schichtholzverbund wird hinsichtlich der Energieauf-

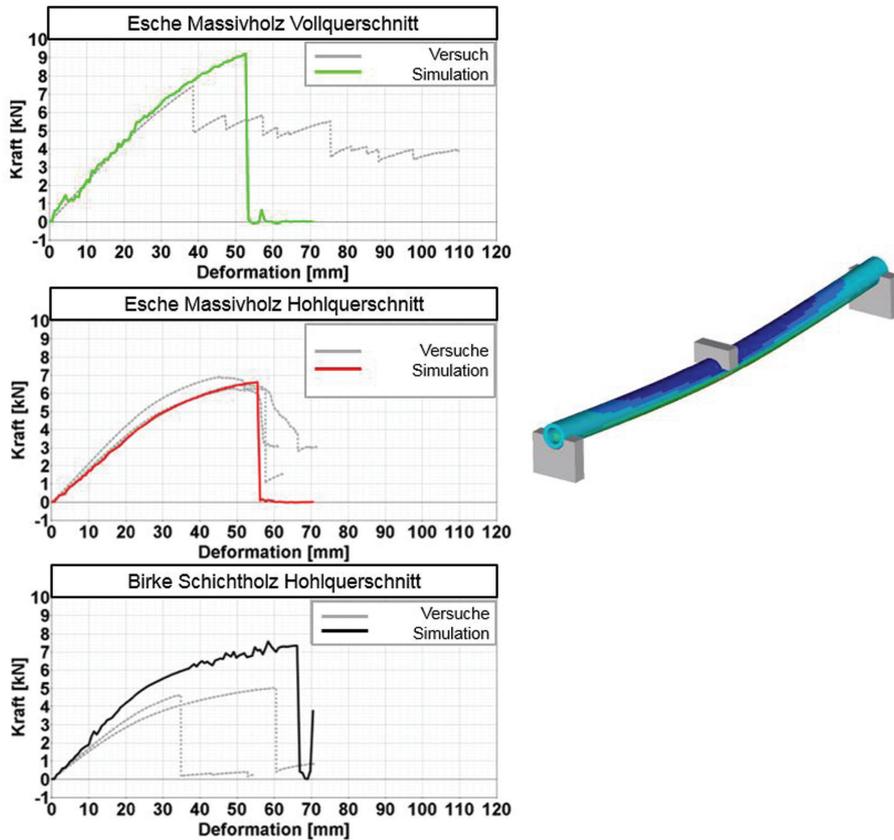


Bild 11
 Links: Vergleich Kraft-Weg-Kurven aus statischem 3-Punkt-Biegeversuch der Instrumententräger-Baukonzepte Vollquerschnitt Massivholz, Rohrquerschnitt Massivholz und Rohrquerschnitt Schichtholz im Versuch (graue Linien) mit Simulation (Esche Vollquerschnitt = grüne Linie, Esche Rohrquerschnitt = rote Linie, Birke-Schichtholz Rohrquerschnitt = schwarze Linie). Rechts: Prinzipdarstellung der Bauteilbelastung in der Simulation

Holz bislang primär mit der Versuchsanordnung des sogenannten Split-Hopkinson Bar untersucht. Dabei konnte eine Anhebung der Festigkeit (bei Druckbelastungen) bei hohen Dehnraten ($500 - 1000 \text{ s}^{-1}$) von mehr als einer Verdopplung im Vergleich zu geringen Belastungsgeschwindigkeiten beobachtet werden [23]. Im Zuge der durchgeführten Crashversuche mit den Holz-Instrumententrägern traten laut FE-Simulation Dehnraten in der Größenordnung von 100 s^{-1} auf, welche um ein Vielfaches von den in [23] durchgeführten Versuchen abweicht. Aufbauend auf den abgeleiteten Ergebnissen werden Dehnrateneffekte in Holzverbundwerkstoffen im Zuge der zukünftigen Forschungskooperation versuchstechnisch untersucht und gegebenenfalls Möglichkeiten für die Abbildung bzw. Berücksichtigung mittels FE-Simulation abgeleitet.

Das FE-Holzmodell des Instrumententrägers wurde für den Nachweis der Berechnungsfunktionalität in das CULT-Gesamtfahrzeugmodell integriert und eine Crashesimulation (starre Wand, volle Überdeckung, 50 km/h) durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Gesamtfahrzeugsimulation durch die Integration des Holzverbundbauteils nicht negativ unter den Gesichtspunkten Rechenstabilität und Rechenzeit beeinflusst wird. Dies lässt sich einerseits über das Courant-Kriterium erklären. Da Holz ein ähnliches Dichte-Steifigkeitsverhältnis wie beispielsweise Stahl oder Aluminium aufweist, sind der maximal mögliche Zeitschritt und somit auch die Rechenzeit nahezu identisch. Des Weiteren wurde in der Simulation die Energiebilanz auf Plausibilität überprüft und es konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden.

8 Resümee und Ausblick

Mit der Studie konnte gezeigt werden, dass eine FE-Materialsimulation von Holz und Holzverbundwerkstoffen für komplexe Baustrukturen unter Crashbelastung durchgeführt werden kann. Bei den Simulationen wurde jedoch bislang der Klebstoff als Materialkomponente nicht berücksichtigt. Einzelne Experimente an fortführenden Untersuchungen zeigen, dass sich damit eine Verbesserung des Simulationsergebnisses erzielen lässt. Weitere entscheidende Verbesserungen sind durch zusätzliche Anpassungen des Materialmodells in Bezug auf das Versagens- und



Bild 12
 Erstentwurf des elektrisch betriebenen Schneefahrzeugs Ardenner der Firma Mattro mit Tragstrukturen aus Holzverbundwerkstoffen

nahme bis zum Bauteilversagen in der Simulation deutlich überschätzt, da die im Vergleich zu Holz geringere Klebersteifigkeit nicht berücksichtigt wird. Bei der Bauvariante Esche Massivholz Vollquerschnitt weicht die Simulation sehr deutlich vom Versuch bzgl. der Abbildung des Material- bzw. Bauteilversagens ab. Aufgrund der sehr vereinfachten Materialmodellierung kann die fortschreitende Schädigung

nach Rissinitiierung im Massivholz nicht abgebildet werden.

Wie oben bereits erwähnt, wurden Dehnrateneffekte von Holz und Holzverbundwerkstoffen im Zuge der gegenständlichen Forschungskooperative nicht untersucht und auch im Materialmodell bzw. im Modellaufbau noch nicht berücksichtigt. Aus grundsätzlicher holztechnologischer Sicht wurde die Dehnratenabhängigkeit von

Schädigungsmodell sowie hinsichtlich Dehnrateneffekte zu erzielen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem abgeleiteten Modellansatz funktionale Strukturkomponenten, bestehend aus Holzverbundwerkstoffen, qualitativ in einer frühen Fahrzeugentwicklungsphase hinsichtlich grundsätzlicher Funktion bis zum initialen Versagen bereits jetzt ausgelegt und bewertet werden können. Gleichzeitig hat die Studie auch unzählige offene Forschungsfragen im Bereich der numerischen Simulation von Holz- und Holzverbundwerkstoffen zu Tage gebracht (Materialversagen inkl. Rissfortschritt, Kleberabbildung, Dehnraten von Holz, Verbindungstechnik etc.). Diese werden nun ausführlich im folgend beschriebenen Forschungsvorhaben behandelt.

Das beteiligte Projektkonsortium ist mittlerweile auf eine Anzahl von 20 Partnern aus der industriellen und wis-

senschaftlichen 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 Holzbaukomponenten in der Fahrzeugindustrie und an der Implementierung eines entsprechenden Produktentwicklungsprozesses weiter intensiv gearbeitet. Ziel dabei ist es, mit ausgewählten Anwendungsfällen anhand von realen Fahrzeugen die mögliche Erweiterung eines Materialmix in Richtung Holzverbundwerkstoffe für den umfassenden Fahrzeug- und Produktentwicklungsprozess umzusetzen. Dabei wird neuen und innovativen Holzwerkstofflösungen, Fertiigungs- und Verbindungstechniken sowie virtuellen Entwicklungsmethoden eine besondere Bedeutung zukommen,

um Holzverbundwerkstoffe erfolgreich in Konstruktionen im Sinne des Multi-Material-Leichtbaus zu integrieren. Bild 12 zeigt einen ersten Entwurf 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.

Danksagung: Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung durch das Projekt „Wood C.A.R.“, gefördert durch die Österreichische Förderungsgesellschaft, FFG, Steirische Wirtschaftsförderung (SFG) sowie Standortagentur Tirol (Projekt No.: 861.421) unter der Teilnahme der Firmpartner ACStyria Mobilitätscluster GmbH, Collano AG, DOKA GmbH, DYNAmore GmbH, EJOT Austria, Forst-Holz-Papier, Holzcluster Steiermark GmbH, IB-Steiner, Lean MC GmbH, Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG, MAN Truck & Bus AG, MATTRO Mobility Revolutions GmbH, Volkswagen AG und Weitzer Parkett GmbH & CO KG.

Literatur

- [1] Friedrich, E. H. (Hrsg.) (2013): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. 1. Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-1467-8, ISBN 978-3-8348-2110-2 (eBook)
- [2] Braess, H.-H.; Seiffert, U. (2013): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 7. Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-01690-6, ISBN 978-3-658-01691-3 (eBook)
- [3] Dufflou 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
- [4] Herbeck, L.; Lang, M. (2012): Die Industrialisierung der Composites-Produktion, Vortrag: 2. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau. Stuttgart, 10.07.2012
- [5] Shah, D. U. (2013): Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review. *Journal of Materials Science*, 48: 6083–6107
- [6] Coquel, M. (2014): Fiber-Patch-Preforming [FPP] Optimised CFRP design and efficient production, Vortrag: Innovationstag Composite Simulation. CFK-Valley Stade, 15.05.2014
- [7] Faruk, O.; Bledzki, A.K.; Fink, H-P.; Sain, M. (2014): Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299: 9–26
- [8] Hoffmann, B.; Chabbert, B.; Monties, B.; Speck, T. (2003): Mechanical, chemical and X-ray analysis of wood in the two tropical lianas *Bauhinia guianensis* and *Condylocarpon guianense*: variations during ontogeny. *Planta*. 217: 32–40
- [9] Salmén, L.; Burgert, I. (2009): Cell wall features with regard to mechanical performance. A review. *Holzforschung*. 63: 121–129
- [10] Song, J., et al. (2018) Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. 224 | *NATURE* | VOL 554 | 8 February 2018. doi:10.1038/nature25476
- [11] Kollmann, F. (1955): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe / von Franz Kollmann. Springer. Berlin
- [12] Kollmann, F.F.P.; Côté Jr., W.A. (1968): Principles of Wood Science and Technology – Solid Wood. ISBN: 978-3-642-87930-2
- [13] 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
- [14] Kohl, D.; Böhm, S. (2014): Holzbasierte Multi-Materialsysteme für den Einsatz im automobilen Rohbau DVS-Berichte Band 303, ISBN 978-3-87155-575-6, DVS Media GmbH Düsseldorf, 2014
- [15] Kohl, D.; Wicke, T.; Alsmann, M.; Böhm, S. (2014): Holz in der modernen automobilen Karosserie. *Holztechnologie* Band 55, Heft 6: 44–49, IHD, Dresden
- [16] Tabiei, A.; Wu, J. (2000): Three-dimensional nonlinear orthotropic finite element material model for wood. *Composite Structures*. 50: 143–149
- [17] Lukacevic, M.; Füssl, J.; Lampert, R. (2014): Failure mechanisms of clear wood identified at wood cell level by an approach based on the extended finite element method. *Engineering Fracture Mechanics*
- [18] Kandler, G.; Füssl, J.; Eberhardsteiner, J. (2014): Stochastic finite element approaches for wood-based products: theoretical framework and review of methods. *Wood Sci Technol*. DOI 10.1007/s00226-015-0737-5
- [19] Bodig, J.; Jayne, B.A. (1982): Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York, NY
- [20] Keylwerth, R. (1951): VDI Forschungsheft 430 – Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagehölder. Düsseldorf, Deutscher Ingenieur-Verlage GmbH
- [21] LSTC – Livermore Software Technology Corporation (2017): <http://www.lstc.com/products/lstc-dyna>. aufgerufen am 20.11.2017
- [22] LSTC (2015): LS-DYNA Keyword User's Manual – Volume II – Material Models, LS-DYNA R8.0, 03.08.2015 (r:6307)
- [23] Fritz, W. (2013): CULT – Cars' Ultra Light Technologies. Blue Globe Report – Mobilität #1/2013, Klima- und Energiefonds
- [24] Wouts, J.; Haugou, G.; Oudjene, M.; Coutellier, D.; Morvan, H. (2016): Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities – Part A: Experimental investigations. *Composite Structures* 149 (2016) 315–328