

## Referentenporträt

**Diplomingenieur**  
**Werner Leitgeb**  
**Virtual Vehicle Research Center**  
**Lead Researcher Crash Safety**  
**Mechanics**



### Ausbildung:

- Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau Verkehrstechnik, TU Graz

### Berufliche Stationen:

- Virtual Vehicle Research Center seit 2008

### Tätigkeitsfeld/Schwerpunkte:

- Vehicle Safety, Battery Safety, FE Simulation

### Kontakt:

Telefon: +43 316 873 9629

Email: [Werner.leitgeb@v2c2.at](mailto:Werner.leitgeb@v2c2.at)

## Holz im strukturellen Fahrzeugbau

*Werner Leitgeb, Thomas Jost, Patrick Mayrhofer, Wolfgang Wagner; VIRTUAL VEHICLE  
Stefan Kirschbichler; Institut für Fahrzeugsicherheit, TU Graz  
Ulrich Müller; Institut für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe, Boku Wien*

### Zusammenfassung

Vorstellung der Machbarkeitsstudie Holz im strukturellen Fahrzeugbau und Ausblick

Im modernen Fahrzeugbau wird eine steigende Menge an neuen Leichtbaumaterialien und Verbundwerkstoffen wie Glasfaser und Kohlefaserverbundwerkstoffe verbaut, um Gewicht einzusparen und die steigenden Anforderungen bezüglich der Abgaswerte erreichen zu können. Diese Werkstoffe sind allerdings schwer zu bearbeiten und führen aufgrund ihres Materialpreises und dem erhöhten Aufwand bei der Fertigung zu einer Erhöhung der Fertigungskosten. Holz ist ein Leichtbauwerkstoff mit exzellenten mechanischen Eigenschaften, gut bearbeitbar und in großer Menge verfügbar. In der Vergangenheit wurde Holz als Konstruktionsmaterial im Maschinen-, Fahrzeug- und Flugzeugbau erfolgreich 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. In den letzten Jahren wurde der mögliche Einsatz von Holz in der Automobilindustrie intensiv diskutiert, und Fahrzeughersteller haben bereits Forschungsprojekte (HAMMER (<http://www.projekt-hammer.de/>), Biofore concept car ([www.bioforeconceptcar.upm.com](http://www.bioforeconceptcar.upm.com)), NIOS (<http://cad.burg-halle.de/nios-2010.html>)) in diese Richtung initiiert.

Der Fahrzeugentwicklungsprozess, Konstruktion und Engineering findet heute mehrheitlich virtuell statt. Die für die Strukturauslegung nötigen Berechnungsprogramme erlauben, neben statischen und dynamischen Belastungen auch den Crashfall zu simulieren. Die Grundlage dieser Simulationsprogramme sind Werkstoffmodelle, die auf eine Datenbank mit detaillierten Werkstoffkennwerten zugreifen. Speziell für die Anforderungen „dynamische Belastung im Crash“ sind diese Daten für Holz und Holzverbundwerkstoffe nicht verfügbar. Insbesondere bei hoch dynamischer Belastung und im Crashfall ist zu untersuchen, ob das Verformungsverhalten von Holz mit Hilfe von Simulationsmodellen vorhergesagt und in weiterer Hinsicht damit Komponenten entsprechend ausgelegt werden können. Eine gute Basis dafür liefern Anwendungen des Ingenieurholzbaus und der Baustatik, wo ähnliche Methoden bereits erfolgreich angewendet werden. Holzelemente werden in der Automobilindustrie seit Beginn der industriellen Herstellung von Fahrzeugen für dekorative Zwecke und für nichttragende Anwendungen eingesetzt. Die hier vorgestellte Machbarkeitsstudie hat sich ausdrücklich zur Aufgabe gestellt,

die Grundlagen zu schaffen, um tragende Strukturkomponenten basierend auf Holz in Fahrzeuge zu implementieren. Holz soll als konstruktives Material zum Einsatz kommen, da erst durch einen breiteren Einsatz die Gewichts- und möglichen Kostenvorteile durch den Werkstoff Holz zum Tragen kommen. Mit der Machbarkeitsstudie wurden die technischen Grundlagen und das ökonomische Potential des Werkstoffs Holz für die moderne Fahrzeugindustrie nachgewiesen. Basierend auf den vielversprechenden Ergebnissen dieser Machbarkeitsstudie wurde im April 2016 ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt gemeinsam mit einem umfangreichen Konsortium aus Holzindustrie, Automobilindustrie und Wissenschaft Rahmen des COMET Förderprogramms der FFG für 4 Jahre beantragt.

## 1 Ausgangslage

### 1.1 FE-Simulation Holz – Ansätze für statische Anwendungen

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden Berechnungsmethoden zur Materialsimulation von Holz, wie z.B. Finite Elemente Methoden (FEM), auch in der Holzforschung für Ingenieurholzbau und Baustatik entwickelt und angewandt. Im Bereich statischer Berechnungen und Auslegungen des konstruktiven Ingenieurholzbaus gehört FEM heute zum Stand der Technik. Aufgrund des hohen Messaufwandes zur Werkstoffdatengenerierung wurde dabei bisher teilweise auf historische Kenndaten von Holz und Holzwerkstoffen zurückgegriffen. Insbesondere die elastischen Konstanten basieren vorrangig auf Untersuchungen aus der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts. Aufgrund der validen Ergebnisse im Ingenieurholzbau bei der Materialsimulation wird angenommen, dass Holz und Holzwerkstoffe auch mit den in der Automobilindustrie gängigen Computerprogrammen simuliert werden können.

### 1.2 Crashsimulation in der Fahrzeugtechnik

Bereits in der Vorentwicklungsphase von Gesamtfahrzeugen muss aufgrund der Lastenheftvorgaben mit dem Schwerpunkt Treibstoffverbrauchs- bzw. CO<sub>2</sub>-Reduktion eine optimale Abstimmung zwischen dem Unfallverhalten, Masse, Innenraumakustik, Schwingungsverhalten, Betriebsfestigkeit und Antriebsstrang gefunden werden. Insbesondere das Fahrzeuggewicht verursacht mit knapp einem Viertel einen wesentlichen Anteil des Treibstoffverbrauchs, siehe Abb 1. (nach Leohold J. Leichtbau und Nachhaltigkeit – Ergänzung oder Widerspruch?. VDI Fachkongress Leichtbau für den Automobilbau, Stuttgart (2012))



### Das Gewicht verursacht fast ein Viertel des Verbrauchs.

Konzernforschung Volkswagen AG | Prof. Dr.-Ing. Jürgen Leibold

2.VDI Fachkongress Stuttgart | 10.07.2012 |

Abb. 1: Teilstoffverbrauchsbestimmende Faktoren

Die Fahrzeugkarosserie trägt maßgeblich zum Fahrzeuggewicht bei. Die unterschiedlichen Bauweisen zeichnen sich einerseits durch konzeptionelle, konstruktive Unterschiede und andererseits durch die Auswahl unterschiedlicher Werkstoffe (Stahl, Aluminium, Faserverbundwerkstoffe usw.) aus. Aufgrund der steigenden Anforderungen an Sicherheit und Komfort stieg das Fahrzeuggewicht in den letzten Jahrzehnten stark an. Um (Flotten)verbrauchsziele zu erreichen, wurde es nötig, die in Abb 2 dargestellte Gewichtsspirale wieder umzukehren. Komponenten aus Holz könnten dabei einen Teil der kostenintensiven Leichtbauteile ersetzen oder ergänzen. In Bezug auf die Auswahl der Karosseriebauweise und der damit verbundenen Werkstoffwahl spielt, neben der Funktionserfüllung, die Wirtschaftlichkeit der Bauweise im Hinblick auf Kosten und Herstellbarkeit die entscheidende Rolle. Man spricht im modernen Fahrzeugentwicklungsprozess von virtueller Entwicklung und Computer Aided Engineering (CAE). Die darin durchgeführte Berechnungssimulation spielt für das Zusammenwirken von Entwicklung, Produktion, Marketing, Finanzen sowie Qualitätssicherung eine immer bedeutendere Rolle (nach Braess, H.-H., Seiffert, U., Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 7. Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-01690-6).



Abb. 2: Umkehr der Gewichtsspirale

Im Zuge des Fahrzeugentwicklungsprozesses stellt die Fahrzeugsicherheit neben den grundlegenden funktionalen Anforderungen und der Lebensdauer den zentralen Entwicklungsschwerpunkt dar. Dadurch wird gewährleistet, dass Fahrzeuginsassen und Menschen im direkten Fahrzeugumfeld entsprechend gesetzlicher und Verbraucherschutzvorgaben geschützt werden. Im Bereich der Fahrzeugsicherheit werden im Rahmen des virtuellen Fahrzeugentwicklungsprozesses Berechnungssoftwarepakete eingesetzt, die in FEM- (Finite Elemente Methode), MKS- (Mehrkörpersysteme) und Optimierungssoftware unterteilt werden können. Für die nichtlineare Strukturberechnung wird größtenteils auf rechenzeit-intensive explizite FEM zurückgegriffen. Die Vielfalt der Anwendungsgebiete sowie die Lösung komplexer Probleme wurden erst durch die Entwicklung leistungsstärkerer Prozessoren und Rechenclustern möglich. In Folge dessen können Einzelkomponenten- und Gesamtfahrzeugsimulationen im Crashbereich durchgeführt werden.

Um Holz für die Fahrzeugindustrie interessant und anwendbar zu machen, muss sichergestellt sein, dass dieser Werkstoff in der momentan vorhandenen Entwicklungsumgebung sowohl strukturoptimiert als auch wirtschaftlich entwickelbar und einsetzbar ist.

## 2 Vorgehensweise

### 2.1 Materialdatenermittlung

Für die Ermittlung der Kenndaten für die Materialkarten der FE-Simulation wurden quasistatische Materialprüfungen durchgeführt. Die dabei untersuchten Materialien waren Massivhölzer (Buche, Esche, Kiefer und Birke), Schichthölzer (bestehend aus Birke und Buche) und Sperrholz (bestehend aus Kiefer, Birke und Buche). Alle Materialprüfungen wurden in den Laboreinrichtungen der Universität für Bodenkultur Wien (Boku Wien) an einer Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z100 bei konstanter Temperatur von 20 °C und 0,1 mm/s Prüfgeschwindigkeit durchgeführt. Die Dehnungsmessung erfolgte mittels eines mechanischen Längenänderungssensors vom Typ Macrosens, Zwick/Roell. Getestet wurden die Festigkeitseigenschaften längs

und quer zur Faser, in Zug und Druckrichtung, sowie die Biegeeigenschaften. Des Weiteren wurde entsprechendes Bild- und Videomaterial der unterschiedlichen Prüfanordnungen erstellt. Dies dient in weiterer Folge unter anderem der Modellvalidierung.

## 2.2 FE Modellerstellung/ Materialkarten

Ziel der Materialmodellierung war es, für jede verwendete Holzart (Kiefer, Rotbuche, Esche und Birke) eine solver-spezifische (in diesem Fall für den expliziten FE Solver LS.Dyna) Materialkarte zu generieren, mit der die getesteten Holzwerkstoffe (Massivholz, Sperrholz, Schichtholz) simuliert werden können. Die dazu notwendigen Kennwerte wurden aus den durchgeführten, oben beschriebenen Materialprüfungen gewonnen. Diese sind Dichte, Elastizitätsmodul in Longitudinal- und Radialrichtung, Schubmodul aus 3- bzw. 4-Punkt Biegeversuch, Versagensdehnung, Druckfestigkeit, sowie Zugfestigkeit in Longitudinalrichtung. Weitere Materialkennwerte, wie Elastizitätsmodul in Tangentialrichtung, Querdehnungszahlen, Zugfestigkeit in Tangentialrichtung sowie Scherfestigkeit, wurden größtenteils aus der Literaturlatenbank entnommen. Ein wichtiges Thema hinsichtlich der Modellierung von Holzkomponenten ist die Berücksichtigung der Materialrichtungen, respektive die daraus resultierenden richtungsabhängigen Festigkeitseigenschaften (Anisotropie) des gewachsenen Werkstoffes Holz. Diese sogenannte Materialorientierung, also die Ausrichtung der einzelnen Materialachsen (Faser- sowie Tangential- und Radialrichtung), wird mithilfe der Vorgabe von Richtungsvektoren definiert, siehe Abb 3.



Abb 3: Koordinatensystem Vollholz links [Niemz, P.; 2011], Faserwinkel an verklebtem Vollholz Rundstab (Durchmesser 60 mm).

Mit den Materialkarten wurden die Massivholz-, Schicht- und Sperrholzproben mit Hilfe von 3D-Volumenelementen und 2D-Schalenelementen modelliert und die durchgeführten Versuche simuliert, um das verwendete Materialmodell zu validieren. Schalenelemente haben aufgrund geringerer Elementanzahl, insbesondere im Anwendungsbereich der Gesamtfahrzeug Crashsimulation, eine hohe Relevanz. Bei dem Materialmodell handelt es sich um ein orthotropes Materialmodell, das das holztypische idealplastische Verhalten in unterschiedliche Achsrichtungen zulässt. Des Weiteren kann Festigkeit und Versagen für Zug- und Druckbelastung asymmetrisch definiert werden. In dem Materialmodell sind vier dehnungsbasierte Versagensmoden (Faserrichtung Zug/Druck, Matrix Zug/Druck) implementiert. Die durchgeführten Materialversuche und die gewonnenen Kennwerte dienen zur Erstellung von Materialkarten. Die nachfolgende Materialsimulation der jeweiligen einachsigen Zug- und Druckversuche bzw.

Biegeversuche wurden entsprechend simuliert und die Ergebnisse aus der Materialsimulation wiederum den realen Versuchen gegenübergestellt. Mit den durchgeführten Simulationen konnte, wie in Abb 4 dargestellt, das Materialverhalten für die untersuchten Holzwerkstoffe (Massiv-, Schicht- und Sperrholz) und die unterschiedlichen Holzarten (Birke, Kiefer, Esche, Buche) mit sehr guter Übereinstimmung abgebildet werden. Dabei wurde nicht nur, wie bei vielen Simulationen in Anwendungen des Holzbaus, das elastische Verhalten abgebildet, sondern das Materialverhalten wurde auch im plastischen Bereich, bis hin zum Versagenszeitpunkt simuliert. Dabei konnte eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und realem Werkstoffverhalten nachgewiesen werden.

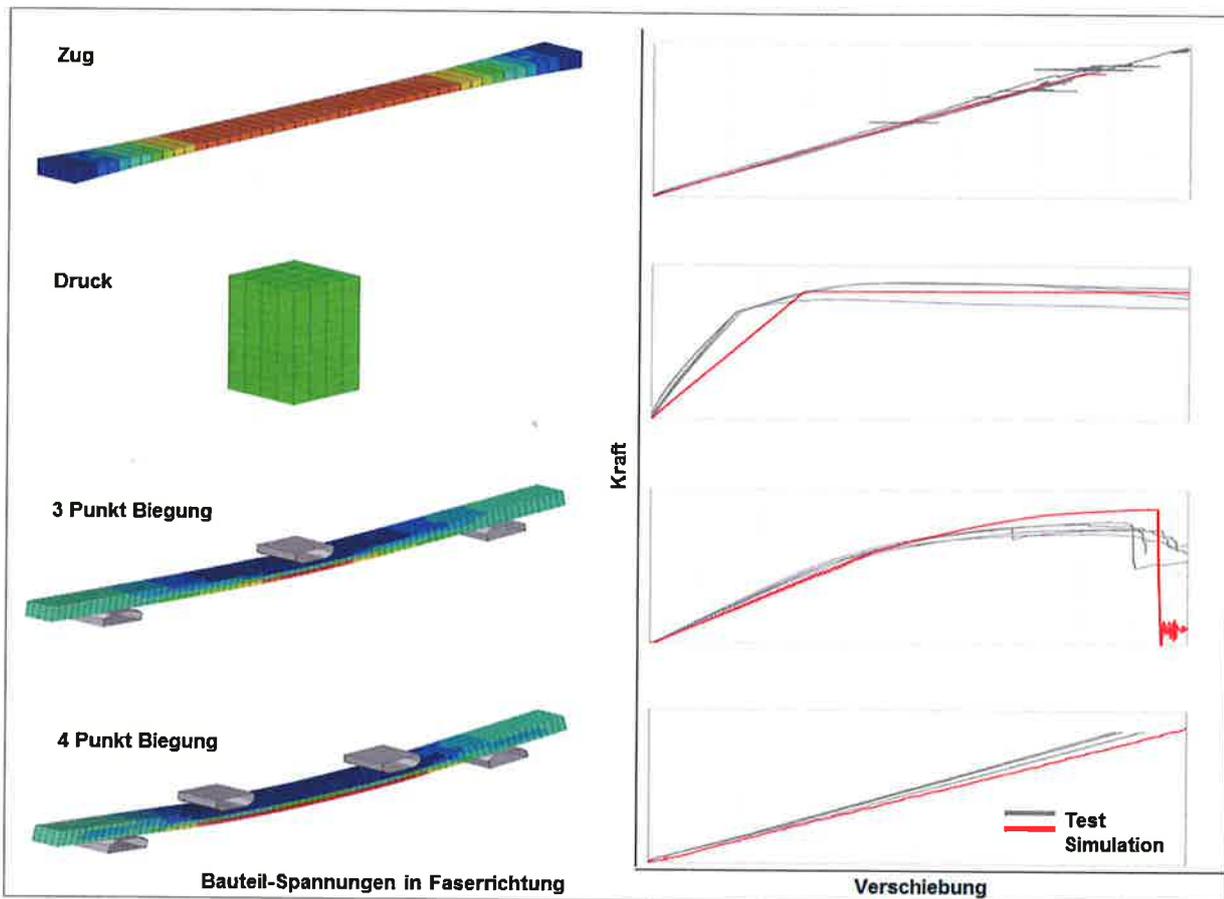


Abb 4: Finite Elemente Simulationsmodelle und der Massivholz Materialversuche „Kiefer Vollholz“ als 3D Volumenelement mit typischer Netzgröße von rund 5mm Kantenlänge.

### 2.3 Prinzipbauteile und FZG Komponenten

Um über den Labormaßstab hinauszukommen, wurden eine Vielzahl von einfachen Prinzipbauteilen und einige Ersatzfahrzeugkomponenten entwickelt und als reale Bauteile hergestellt. Damit sollten einerseits erste Grundlagen für eine geeignete zukünftige Materialauswahl geschaffen werden und andererseits sollten erste Lösungsansätze für mögliche, vorteilhafte Herstellverfahren für Holzbaukomponenten verifiziert werden. Weiter konnten durch die Komponenten realitätsnahe Versuchsdaten hinsichtlich Versagensverhalten, Performance und

Simulation gewonnen werden. Als Vorgabe bzw. Vorlage für die Substitute aus Holz dienten FZG Komponenten aus dem Konzeptfahrzeug CULT, entwickelt von Magna. Als potenziell realisierbar erwiesen sich die Komponenten Instrumententräger, Unterboden und Rücksitzlehne. Um Realitätsnähe zu gewährleisten, wurden die Bauteilanforderungen bzw. das Lastenheft davon abgeleitet und die nötigen Prüfkfigurationen für statische und dynamische Belastungen festgelegt. Zur Versuchsdatengenerierung wurde der Großteil der Komponenten in aufwendigen quasistatischen und dynamischen Versuchen gezielt unter Laborbedingungen in den Einrichtungen der Boku Wien sowie im Crashlabor des Instituts für Fahrzeugsicherheit der TU Graz bis zum Versagen getestet. Die Komponenten wurden mittels CAD Programmen entwickelt, was ein Überführen in entsprechende FE Modelle erleichtert. Die Erstellung der FE Simulationsmodelle orientiert sich an in der Fahrzeugindustrie gängigen Methoden und Richtlinien, sowohl was die Netzqualität als auch was die Elementgröße betrifft. So konnte sichergestellt werden, dass die Bauteile auch in Gesamtfahrzeugmodellen ohne Einschränkungen zum Einsatz kommen konnten.

## 2.4 Modellaufbau und Simulationsergebnisse

Generell ist über sämtliche dynamische Bauteiltests hinweg zu erkennen, dass die gewonnenen Ergebnisse sehr gut reproduzierbar sind, d.h., innerhalb einer Bauteilkonfiguration desselben Typs sind nur geringe Abweichungen im Kraft-Weg-Verhalten sowie bei der generellen Bruchcharakteristik aufgetreten. Beispielhaft sind in Abb 5 Komponenten aus Schichtholz in Versuch und Simulation dargestellt.

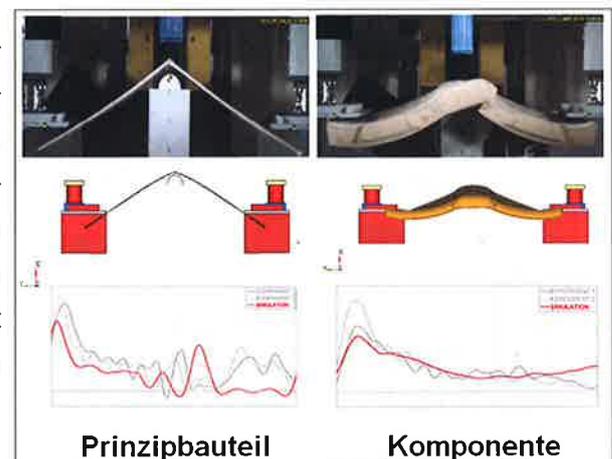


Abb. 5: Prinzipbauteil und Komponenten aus Schichtholz

Der mehrlagige Schichtholzaufbau wurde im Simulationsmodell ebenfalls abgebildet, siehe Abb 6.



Abb. 6: Mehrlagiges Schichtholz

Außerdem wurden dynamische Crashversuche an einfachen Prinzipbauteilen und möglichen Fahrzeugkomponenten durchgeführt. In Abb 7 sieht man die gute Übereinstimmung bezüglich Verformung und Versagen der Komponente Instrumententräger zu den Zeitpunkten kurz vor und nach dem Versagen. In Abb 7 ist oben das Simulationsmodell und sind unten Bilder aus den Highspeed Aufnahmen zum jeweils gleichen Zeitpunkt dargestellt.

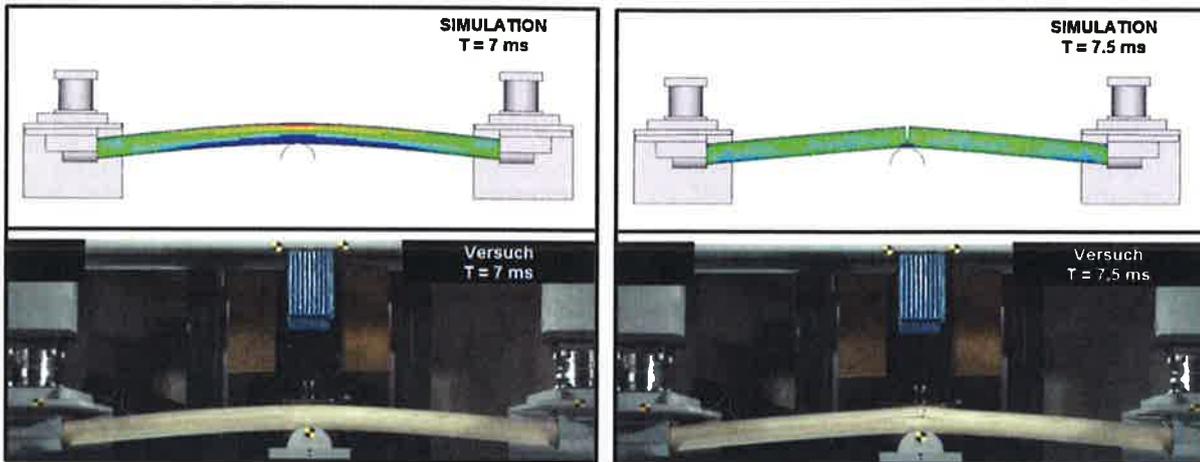


Abb. 7: Holz Komponente Instrumententräger beim hochdynamischem Crashversuch

Abschließend soll noch auf interessante Versuchsergebnisse aus quasistatischer und dynamischer Belastung hingewiesen werden. Wie in Abb 8 ersichtlich, weisen die Kraft-Weg-Verläufe der statischen Untersuchung im Vergleich zu den dynamischen Versuchen eine signifikant unterschiedliche Charakteristik auf. Diese Eigenschaft findet sich auch im Simulationsmodell wieder.

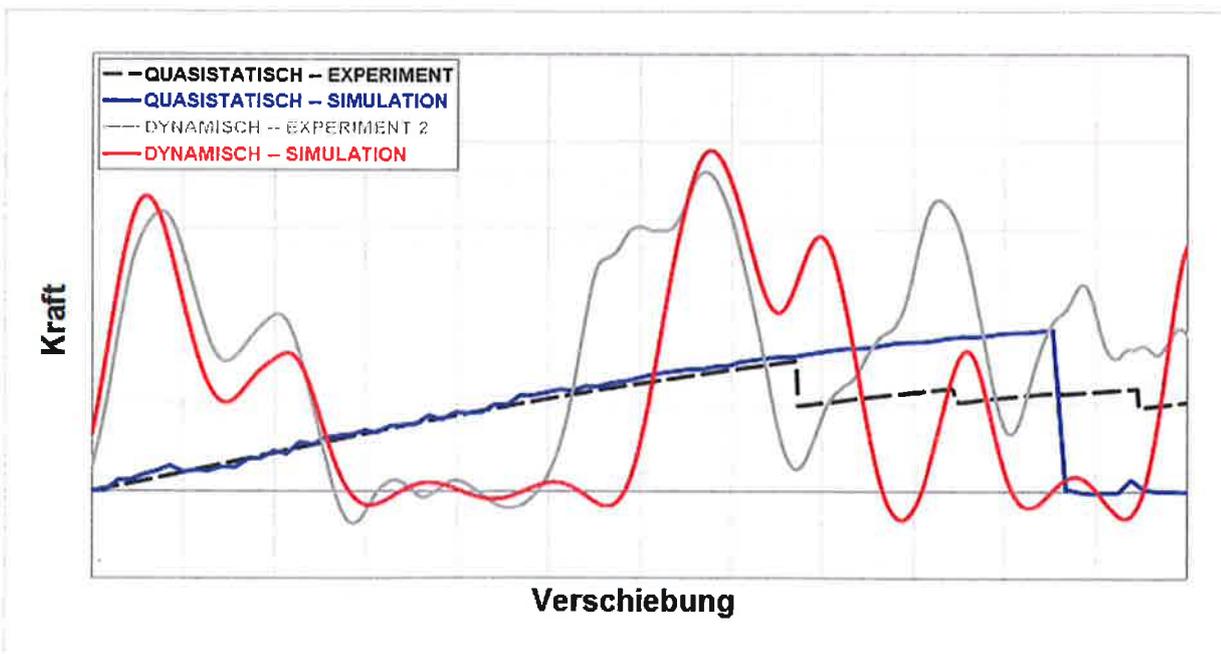
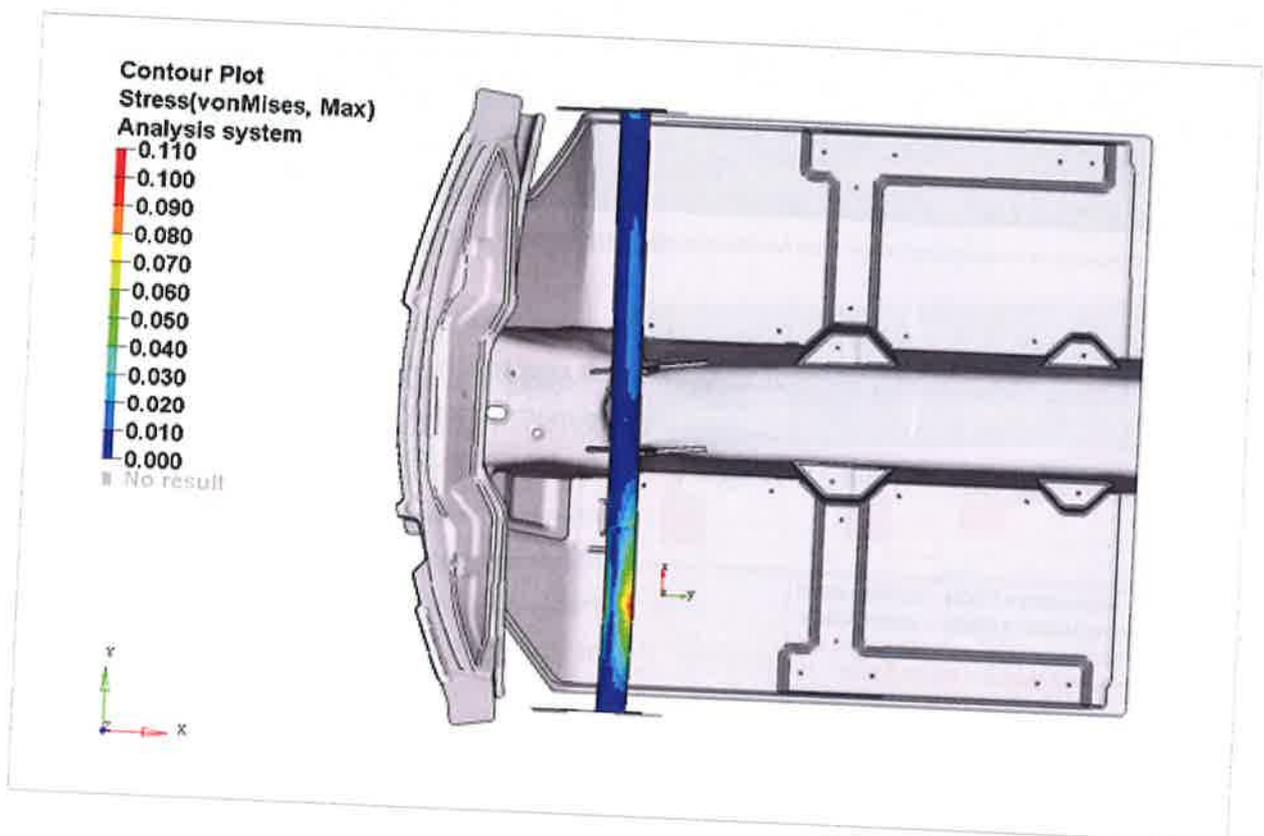


Abb. 8: Verhalten der Komponente Instrumententräger

## 2.5 Berechnungen im Gesamtfahrzeugumfeld

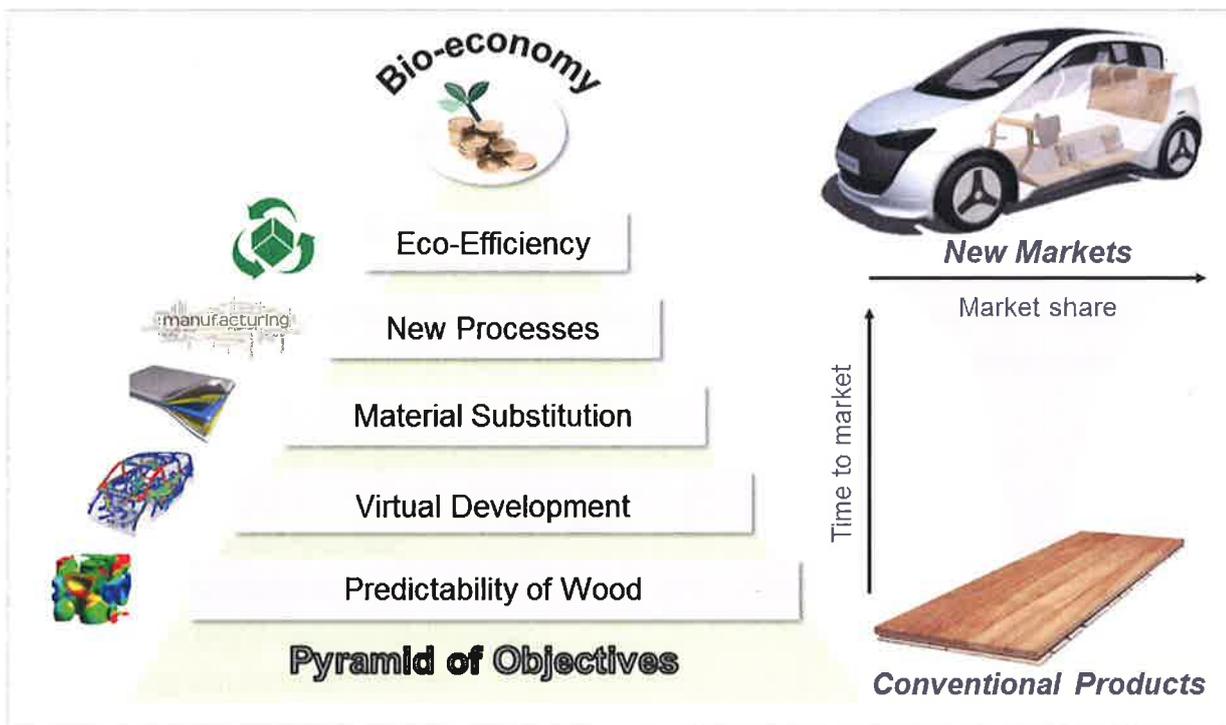
Anhand eines Demonstrationsobjektes (Instrumententräger) wird die prinzipielle Anwendbarkeit des zuvor an Prinzipbauteilen getesteten Holzmaterialmodelles in einem Gesamtfahrzeugsimulationsmodell in Form eines stabilen und rechenfähigen Simulationsmodelles aufgezeigt. Das neue Materialmodell zeigte keinen negativen Einfluss auf den Berechnungsaufwand, da weder Elementgröße noch der Berechnungszeitschritt geändert wurden. Somit konnten tatsächlich auftretende Bauteilbelastungen für anspruchsvolle Crashlastfälle überprüft und bewertet werden. In Abb 9 sieht man beispielhaft den Instrumententräger aus Vollholz Esche wie er sich im Gesamtfahrzeug zum Crashzeitpunkt 25 Millisekunden verhält. Danach wurde eine Schadensbewertung durchgeführt.



## 3 Ausblick

Mit der entwickelten Methode können Holzkomponenten bis zum Versagen simuliert und bewertet werden. Das legt den Grundstein für eine zukünftige virtuelle Bauauslegung und den üblichen iterativen Designprozess in der Automobilindustrie. Aufgrund der guten und vielversprechenden Ergebnisse wurde im April 2016 im Rahmen des COMET Förderprogramms der FFG ein für 4 Jahre anberaumtes Forschungs- und Entwicklungsprojekt beantragt. Das umfangreiche Konsortium aus Holzindustrie, Automobilindustrie und Wissenschaft wird sich mit der gesamten Wertschöpfungskette von auf Holzwerkstoffen basierenden Produkten beschäftigen. Nur so können die hohen, an neue, innovative Produk-

te im Automobilssektor gestellten Anforderungen hinsichtlich bio-ökonomischer Aspekte und wirtschaftlicher Anwendbarkeit mit hoher Wertschöpfung erfüllt werden. Folgende Anforderungen werden in der Bedürfnispyramide in Abb 10 dargestellt. Der Holzwerkstoff muss verstanden werden und beherrschbar sein, um ihn im virtuellen Entwicklungsprozess einsetzen zu können. Das heißt, die Werkstoffeigenschaften müssen mit heute in der Fahrzeugindustrie gängigen Berechnungsmethoden berechenbar sein, denn dadurch können herkömmliche Materialien durch neue, innovative Werkstoffkombinationen gezielt ersetzt und ergänzt werden. Hinsichtlich Qualitätssicherung sind neuen Methoden und Kriterien für die Materialauswahl von natürlich gewachsenem Rohstoff nötig. Auch sind neue Prozesse für dauerhaft haltbarere und belastbare Holz-Holz bzw. Holz-Nichtholz Verbindungen sowie für das Testen und Validieren ausgelegter Fahrzeugkomponenten den Entwicklern verfügbar zu machen. Entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz von Holzkomponenten ist allerdings, dass der Gesamtprozess wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll dargestellt werden kann.



#### 4 Danksagung

Dieses Projekt entstand in Zusammenarbeit mit dem VIRTUAL VEHICLE Research Center in Graz, Österreich. Die Autoren bedanken sich für die Förderung im Rahmen des COMET K2 - Competence Centers for Excellent Technologies Programms des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), des Österreichischen Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (bmfwf), der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) des Landes Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderung (SFG). Ebenfalls danken sie den unterstützenden Firmen und Projektpartnern Weitzer Par-

kett, IB STEINER, Lean Management Consulting, MAGNA, Holzcluster Steiermark, Autocluster Steiermark sowie der Technischen Universität Graz und der Universität für Bodenkultur Wien.