

# Der Klang von Kurzglasfasern in Kunststoffen

*Ein neues Konzept zur integrativen Akustiksimulation sagt das richtungsabhängige Körperschallverhalten von kurzglasfaserverstärkten Bauteilen vorher*

Die Kenntnis des genauen Schwingverhaltens von Kunststoffbauteilen spielt sowohl für Akustikbetrachtungen als auch für Lebensdauervorhersagen eine entscheidende Rolle. Um die von der Faserorientierung abhängigen akustischen Eigenschaften kurzglasfaserverstärkter Bauteile berechnen zu können, wurde am Institut für Kunststoffverarbeitung in Aachen eine vollständige Simulationskette nach dem Prinzip der integrativen Simulation entwickelt.

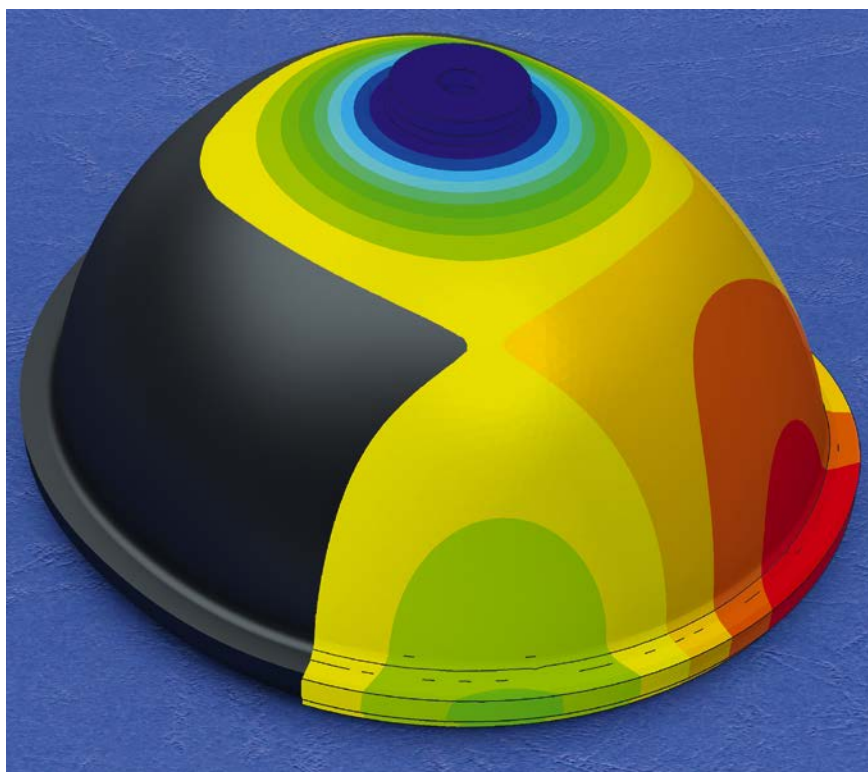
Technische Kunststoffbauteile sind in ihrer Einbausituation oft Schwingungen ausgesetzt und werden dadurch zur Geräuschabstrahlung angeregt. Die niedrige Dichte und die geringe Steifigkeit dieser Werkstoffe führen zu dem akustisch ungünstigen Verhalten, dass Bauteile nicht nur über eine geringe Massenträgheit verfügen, sondern schon bei geringen Belastungen mit großen Wegamplituden schwingen. Die Kenntnis über das akustische Verhalten von Kunststoffbauteilen gewinnt zudem an Bedeutung, weil Gesetze zum Lärmschutz zunehmend verschärft werden. Darüber hinaus entwickelt sich die subjektiv empfundene Geräuschqualität eines Produkts ebenfalls immer mehr zu einem wichtigen Qualitätskriterium, das Kaufentscheidungen maßgeblich beeinflussen kann [1, 2].

Eine vielversprechende Möglichkeit, bereits in einer frühen Phase der Entwicklung Aussagen über das akustische Verhalten von Bauteilen treffen und somit Kosten einsparen zu können, besteht in der numerischen Simulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder der Randelementmethode (BEM) [3, 4]. Thermoplastische Kunststoffe werden bei Akustiksimulationen in ihrem mechanischen Verhalten jedoch durchgängig als richtungsunabhängig, also isotrop modelliert.

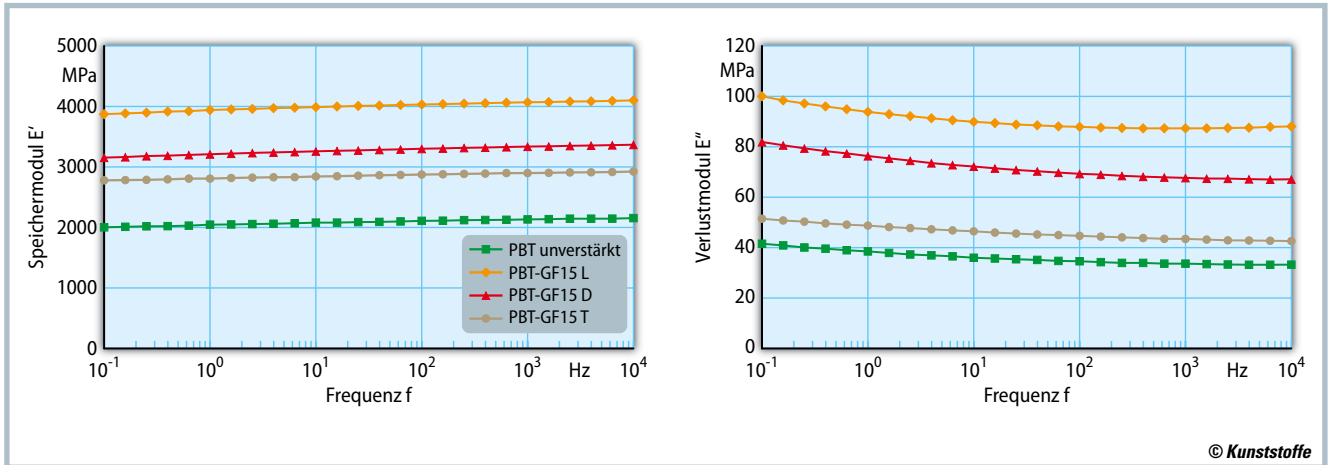
Anisotrope kurzfaserverstärkte Thermoplaste, die häufig für akustisch rele-

vante Komponenten wie Ansaugrohre oder Zylinderkopfhauben verwendet werden, lassen sich auf diese Weise nicht hinreichend genau abbilden [5]. Im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojekts hat die Arbeitsgruppe „Formteilauslegung/Akustik/Lebensdau-

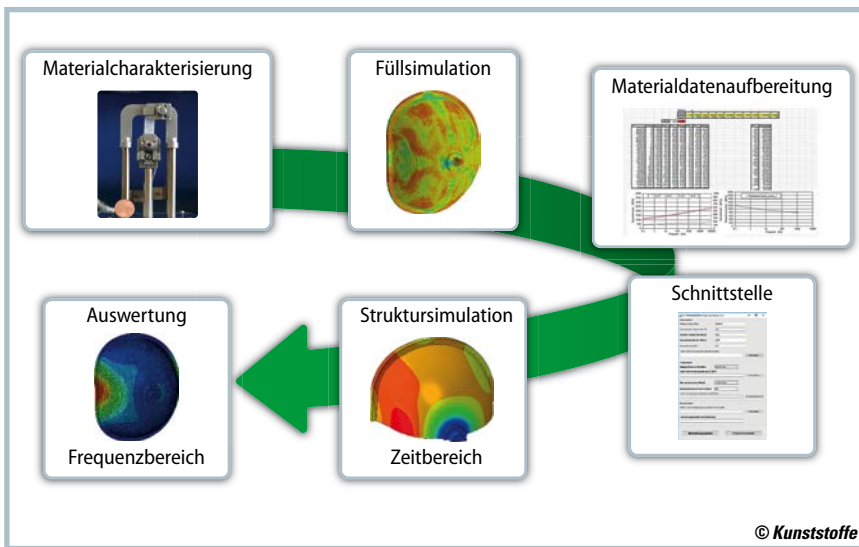
er“ am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen, daher eine Methode zur Simulation des anisotropen akustischen Bauteilverhaltens entwickelt, die die akustisch relevanten richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften Steifigkeit und Dämpfung berücksichtigt. »



Die simulierte Eigenschwingform des Modellbauteils wird auf seine Geometrie projiziert dargestellt (© IKV)



**Bild 1.** Als Kennwerte für das viskoelastische Materialverhalten werden die frequenz- und richtungsabhängige Steifigkeit und Dämpfung ermittelt. Die Prüfkörper werden longitudinal (L), diagonal (D) und transversal (T) zur Füllrichtung präpariert (Quelle: IKV)



**Bild 2.** Die Vorgehensweise bei der anisotropen Körperschallsimulation orientiert sich an klassischen integrativen Simulationskonzepten (Quelle: IKV)

### Analyse des anisotrop frequenz-abhängigen Verbundverhaltens

Das richtungsabhängige viskoelastische Materialverhalten von ausgewählten kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten wird unter quasistatischen und dynamischen Belastungen analysiert, um auf diese Weise Kenntnis über das zu implementierende Materialverhalten zu erlangen. Betrachtet werden ein mit 30 Gew.-% Kurzglasfasern verstärktes Polyamid 6 (PA6-GF30, Typ: Durethan BKV30 H2.0) im trockenen und im konditionierten Zustand sowie ein mit 15 Gew.-% Kurzglasfasern verstärktes Polybutylenterephthalat (PBT-GF15, Typ: Pocan KL1-7265; Hersteller in beiden Fällen: Lanxess Deutschland GmbH, Köln). Diese Materialauswahl ermöglicht nicht nur Untersuchun-

gen zum akustischen Verhalten unterschiedlicher Matrixwerkstoffe, sondern auch unterschiedlicher Fasermassengehalte.

Als etablierte Möglichkeit zur Ermittlung des Materialverhaltens unter dynamisch-zyklischer Beanspruchung wird die dynamisch-mechanische Analyse (DMA) eingesetzt. Im Fall thermorheologisch einfacher Werkstoffe [6] werden die in der DMA gemessenen Materialkennwerte zudem nach dem Prinzip der Zeit/Temperatur-Verschiebung (ZTV) zu höheren Frequenzen verschoben, um den für akustische Betrachtungen notwendigen Frequenzbereich von bis zu 4000 Hz abzudecken.

Die Auswertung der ZTV-Masterkurven unterscheidet zwischen Prüfkörpern des Verbundmaterials mit unterschiedli-

cher Faserorientierung und Prüfkörpern des Matrixmaterials (**Bild 1**). Im Fall des Verbundmaterials werden dazu Prüfkörper hauptsächlich longitudinal (L), diagonal (D) und transversal (T) zur Füllrichtung aus spritzgegossenen Platten herauspräpariert. Dabei zeigt sich die Frequenzabhängigkeit der Werkstoffkennwerte Speichermodul (links) und Verlustmodul (rechts), die das Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten im Frequenzbereich darstellen. Im Gegensatz zu den nahezu konstanten Verläufen der Speichermoduln fallen die Verlustmoduln deutlich mit steigender Frequenz ab. Bei den dargestellten Kennwerten des PBT ist darüber hinaus zu erkennen, dass die zusätzlich angegebenen Eigenschaften des Matrixmaterials in der Frequenzabhängigkeit qualitativ denen des Verbundwerkstoffs gleichen.

### Konzeption der integrativen Akustiksimulation

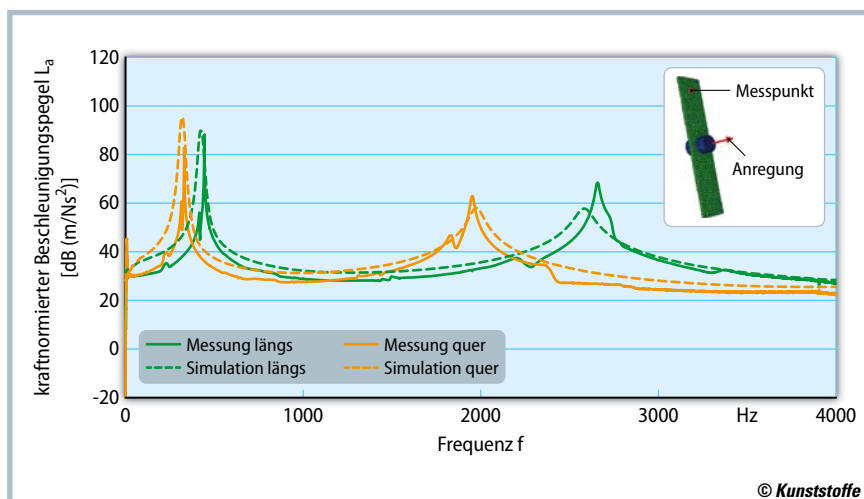
Zentrales Element der entwickelten Methode ist ein neu programmiertes anisotrop linear viskoelastisches Materialmodell zur Berechnung des Verbundverhaltens. Mechanische Simulationen des akustischen Verhaltens werden unabhängig vom Werkstoff im Frequenzbereich ausgewertet, um das Schwingverhalten gezielt bei Eigenfrequenzen beurteilen zu können. Für die direkte Berechnung im Frequenzbereich standen in klassischen FE-Programmen allerdings bis vor Kurzem nicht die notwendigen benutzerdefinierten Materialmodelle in Form von Subroutinen zur Verfügung. Deshalb wurde die Methode für die Berechnung im

Zeitbereich mit dem FE-Solver Abaqus/Explicit (Anbieter: Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island/USA) und einem benutzerdefinierten Materialmodell (umat) umgesetzt (Bild 2). Eine Implementierung für die mit der Abaqus-Version 6.14 eingeführte frequenzabhängige Berechnung mit benutzerdefinierten Materialmodellen (umat) in Abaqus/Standard ist auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse ebenfalls möglich.

### Effiziente Modellierung des Verbunds durch Verwendung des Matrixverhaltens

Für kurzglasfaserverstärkte Thermoplaste gilt die Annahme, dass sich nur die Matrix viskoelastisch verhält, während sich die Fasern elastisch verformen. Die charakteristischen Zeiten der Materialfunktionen stimmen dementsprechend für Verbund und Matrix überein. Darüber hinaus sind die sogenannten arrheodiktischen Grenzfälle für  $t = 0$  und  $t = \infty$  durch die elastische Lösung gegeben. Wenn das Retardationsverhalten der Matrix bekannt ist, lässt sich folglich das Retardationsverhalten des Verbunds ableiten.

Als Eingangsdaten für die Berechnung des orthotropen Materialverhaltens kurzglasfaserverstärkter Thermoplastbauteile werden daher die elastischen Eigenschaften der Fasern und die viskoelastischen Eigenschaften der Matrix sowie die lokalen Faserorientierungen genutzt. Auf Grundlage dieser Daten werden die elementweisen Steifigkeiten anhand mikro-mechanischer Modelle in einer weiterentwickelten Java-Schnittstelle ermittelt. Die Schnittstelle bedient sich dazu der



**Bild 3.** Eine hohe Abbildungsgenauigkeit des richtungsabhängigen Körperschallverhaltens von Rechteckstäben ermöglicht die Validierung der neu entwickelten Simulationsmethode (Quelle: IKV)

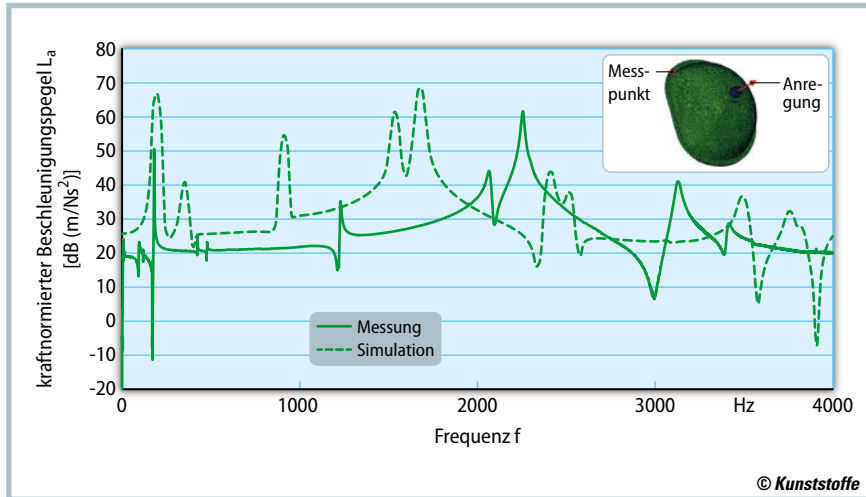
Gleichungen nach Halpin/Tsai und Tandon/Weng [7, 8]. Aus den Eigenschaften des unidirektionalen Verbunds werden mithilfe des „Orientation Averaging“ nach Advani/Tucker die Eigenschaften im Faserkoordinatensystem des jeweiligen Elements bestimmt [9]. Die dazu notwendigen Informationen in Form des Orientierungstensors zweiter Stufe stammen aus Füllsimulationen, die mit der Software Sigmasoft (Anbieter: Sigma Engineering GmbH, Aachen) durchgeführt wurden.

### Exakte Berechnung des Schwingverhaltens

Zur Validierung der Simulationsmethode wurde das Schwingverhalten der Verbundwerkstoffe in vier Stufen untersucht, ausgehend von einer einfachen Geome-

trie in Form von Rechteckstäben über eine Plattengeometrie bis hin zu zwei praxisrelevanten Modellbauteilen. Für die Vermessung kam der institutseigene Akustikprüfstand zum Einsatz, bei dem die Bauteile frei schwingend mit einem elektrodynamischen Shaker angeregt werden. Um das gemessene Bauteilverhalten beurteilen und mit Simulationsergebnissen vergleichen zu können, ist es entscheidend, die Resonanzfrequenzen der verschiedenen Beschleunigungspegel zu betrachten: Die Lage eines Resonanzpeaks erlaubt Rückschlüsse auf die Materialsteifigkeit; anhand der Resonanzhöhe lässt sich die Materialdämpfung beurteilen.

Der Vergleich der Ergebnisse für trockenes PA6-GF30 von Messungen und Körperschallsimulationen für die »



**Bild 4.** Ungeachtet vereinfachender Annahmen in der Modellierung wird auch das Schwingverhalten des Modellbauteils qualitativ gut abgebildet. Im Detail zeigt sich hierbei jedoch noch Verbesserungspotenzial (Quelle: IKV)

## Die Autoren

**Dipl.-Ing. Pascal Brandt** ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen und bearbeitet dort den Themenkomplex Formteileauslegung/Akustik/Lebensdauer/Werkstofftechnik; pascal.brandt@ikv.rwth-aachen.de

**Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann** ist seit 2011 Leiter des IKV und Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen.

### Dank

Das IGF-Forschungsvorhaben 17858 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Allen Institutionen gilt der Dank der Autoren.

## Service

### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/1338333](http://www.kunststoffe.de/1338333)

### English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)

Rechteckstäbe als geometrisch einfachste Prüfkörper offenbart bereits den Vorteil der integrativen Simulationsmethode (**Bild 3**). Die verwendeten FE-Modelle für längs und quer orientierte Stäbe sind identisch, die Materialmodelle unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Faserorientierungen. Im gezeigten Frequenzbereich bis 4000 Hz besitzen diese Stäbe zwei Resonanzpeaks, die Messung und Simulation gleichermaßen wiedergeben. Die Simulationsergebnisse der Rechteckstäbe des PBT-GF15 stimmen, bezogen auf die Wiedergabe der Steifigkeit, sehr gut mit entsprechenden Versuchen überein. Das Dämpfungsverhalten, das sich über die Peakhöhe beschreiben lässt, wird ebenfalls gut wiedergegeben.

Das Modellbauteil „Kokosnuss“ (Hersteller: Lanxess Deutschland GmbH) stellte im Rahmen der Kalibrierung den ersten Schritt zu einem praxisnahen dreidimensionalen Bauteil mit dementsprechend räumlichem Schwingverhalten dar (**Bild 4**). Auch bei diesem Bauteil bildet das Verfahren die Resonanzfrequenzen gut ab. Die Höhe der Beschleunigungspeaks weicht hingegen in den Simulations- und Messergebnissen erkennbar voneinander ab. Mit identischen Materialkennwerten konnte das Schwingverhalten von Rechteckstäben und Plattenbauteilen für das PBT-GF15 mit guter bis sehr guter Übereinstimmung im Vergleich zu den gemessenen Verläufen bestimmt werden. Daher ist die Abweichung bei der Simulation des Modellbauteils auch auf eine Modellierungsstrategie zurückzuführen,

bei der mit größeren finiten Elementen gearbeitet wurde, um die Berechnungsdauer zu verkürzen. Damit geht allerdings auch ein Verlust an Genauigkeit hinsichtlich des anisotropen Werkstoffverhaltens einher, weil mit dementsprechend weniger Elementen lokale Faserorientierungsunterschiede nur eingeschränkt aufgelöst werden können.

### Fazit

Um eine integrative Berechnungsmethode zur Akustiksimulation kurzfaserverstärkter Thermoplastbauteile aufzubauen und in ein kommerzielles FE-Programm zu implementieren, analysierten IKV-Forscher zunächst das frequenz- und faserorientierungsabhängige Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten der betrachteten Werkstoffe und entwarfen auf dieser Basis ein linear viskoelastisches Materialmodell für Berechnungen mit expliziten FE-Solvern. Nach dessen Kalibrierung mithilfe von DMA-Messungen wurde die Berechnungsmethode in einem vierstufigen Prozess an Prüfkörpern und Modellbauteilen unterschiedlich komplexer Geometrie erprobt und erfolgreich validiert.

Besonders bei flächigen Prüfkörpern wird das anisotrope Schwingverhalten quantitativ und qualitativ sehr gut in der Struktursimulation abgebildet. Auch die Übertragung auf die räumlich schwingenden Modellbauteile ist gelungen. Allerdings ermöglicht erst der im Vergleich zu isotropen Simulationsmethoden deutlich gestiegene Modellierungs- und Berechnungsaufwand des integrativen Verfahrens die auf der Berücksichtigung anisotroper Eigenschaften beruhende höhere Abbildungsgenauigkeit. ■

© shutterstock.com/ Oleg Malyshev

**HANSER**

**Wer wird Europameister?**

Das große Tippspiel zur Fußball-EM 2016.

**Tipp abgeben und gewinnen!**

Jetzt auf [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de) **Kunststoffe.de**