

Messtechnische Ermittlung der Strukturintensität bei spritzgegossenen, faserverstärkten Kunststoffen

Dennis Netzband¹, Nikolai Kleinfeller², Mark Fiolka¹, Andreas Nevoigt¹, Andreas Ujma¹, Christian Adams², Tobias Melz^{2,3}

¹ Fachhochschule Südwestfalen, 58644 Iserlohn

² TU Darmstadt Fachgebiet SAM, 64287 Darmstadt

³ Fraunhofer LBF, 64289 Darmstadt

Einleitung

Im Zuge der Produktentwicklung – beispielsweise bei Elektrofahrzeugen – kommt neben dem Leichtbauaspekt der Akustik im Interieur-Bereich eine immer bedeutendere Rolle zu. Störgeräusche können deutlicher wahrgenommen werden und werden vom Kunden als Belästigung empfunden [1]. Zur Gewichtsreduktion werden die Komponenten im Innenraum in der Regel im Spritzgießprozess aus Thermoplasten hergestellt, die zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften mit Fasern oder Füllstoffen verstärkt werden [2]. Die einhergehende Steifigkeitserhöhung führt zu einer Verschiebung von Eigenfrequenzen in höhere Bereiche. Eine genaue Betrachtung der Hörcharakteristik zeigt, dass höhere Frequenzen (von 16 Hz bis ca. 5 kHz) mit einer Abnahme der Hörschwelle einhergehen und somit Störgeräusche eher wahrgenommen werden können [1]. Es entsteht somit ein Zielkonflikt zwischen den Disziplinen Leichtbau und Akustik.

Zur Erzielung einer bestmöglichen Kombination der beiden Disziplinen sollte das akustische Verhalten bereits in frühen Entwicklungsschritten des Produktes optimiert werden. Störgeräusche in Fahrzeugen werden in der Regel durch eine innere oder äußere Geräuschbildung der Komponenten hervorgerufen [2]. Innere Geräuschbildung wird beispielsweise durch Stick-Slip-Effekte verursacht. Bei der äußeren Geräuschbildung werden die Komponenten in Schwingung versetzt und übertragen diese als Körperschall durch ihre Struktur. Der Körperschall wird schließlich von vorhandenen Oberflächen als Luftschall abgestrahlt. Bei einer Optimierung sollten also idealerweise der geräuschverursachende Körperschall sowie seine Ausbreitungspfade im Bauteil optimiert werden. Eine Möglichkeit diese Pfade zu analysieren, ist die Ermittlung der Strukturintensität (STI). Sie bildet das Pendant zur Luftschallintensität im Körperschall. Im Fall der frequenzabhängigen Betrachtung berechnet sich der komplexe STI-Vektor $\underline{\mathbf{I}}(f)$

$$\underline{\mathbf{I}}(f) = (I_x, I_y, I_z) = -\frac{1}{2} \underline{\boldsymbol{\sigma}}(f) \underline{\mathbf{v}}^*(f) \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (1)$$

aus dem mechanischen Spannungstensor $\underline{\boldsymbol{\sigma}}(f)$ und dem komplex konjugierten Geschwindigkeitsvektor $\underline{\mathbf{v}}^*(f)$ nach [3]. Für dünnwandige Strukturen wird die Intensität in Dickenrichtung $I_z = 0$ vernachlässigt und Gleichung (1) auf einen Anteil der Intensität I_x

$$I_x(f) = -N_x v_x^* - N_{xy} v_y^* - M_x \dot{\phi}_y^* + M_{xy} \dot{\phi}_x^* - Q_x v_z^* \quad [\text{Wm}^{-1}] \quad (2)$$

in globaler x-Richtung sowie einen Anteil der Intensität I_y

$$I_y(f) = -N_y v_y^* - N_{xy} v_x^* + M_y \dot{\phi}_x^* + M_{xy} \dot{\phi}_y^* - Q_y v_z^* \quad [\text{Wm}^{-1}] \quad (3)$$

in globaler y-Richtung vereinfacht. Dabei sind $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y, Q_z$ die mechanischen Schnittreaktionen, v_x^*, v_y^*, v_z^* die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors und $\dot{\phi}_x^*, \dot{\phi}_y^*$ die Komponenten des Winkelgeschwindigkeitsvektors. Es ist anzumerken, dass die ersten beiden Terme in den Gleichungen (2) und (3) den Anteil der In-Plane Wellen (Dehn- und Schubwellen) an der STI beschreiben [4]. Aufgrund der vorliegenden Anregungsrichtung im folgenden Fallbeispiel, kann der Anteil der In-Plane-Wellen im Rahmen dieses Beitrags vernachlässigt werden.

In einem momentan laufenden Forschungsprojekt wird das Körperschallverhalten von spritzgegossenen faserverstärkten Kunststoffen mittels der STI untersucht. Dabei muss das lokal anisotrope Materialverhalten bekannt sein und bei der Bestimmung der STI berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Beitrags wird zunächst eine integrative Berechnungsmethode für die numerische Simulation vorgestellt und die wesentlichen Erkenntnisse für eine Weiterentwicklung bestehender Methoden zur experimentellen Bestimmung der STI von lokal anisotropen Bauteilen weiterverwendet. Abschließend werden die Ergebnisse der numerischen Simulation mittels experimenteller Daten validiert.

Integrative Berechnungsmethode für faserverstärkte Kunststoffe

Für die numerische Bestimmung der STI von Bauteilen aus spritzgegossenem Kunststoff wird eine integrative Berechnungsmethode basierend auf einem Finite-Elemente (FE)-Ansatz implementiert [5]. Dabei wird die Faserorientierung eines Bauteils zunächst durch die Simulation des Spritzgießprozesses in der Software Moldflow ermittelt. Anschließend wird unter Verwendung der Materialdaten von Matrix und Füllstoff sowie dem Aspektverhältnis und dem Füllstoffanteil in der Software Digimat ein transversal isotropes Materialmodell berechnet und die Faserorientierungen der Prozesssimulation auf eine FE-Struktursimulation in der Software Abaqus übertragen, sodass für jedes finite Element der Struktursimulation ein unabhängiges Materialmodell vorliegt. Nach der Bestimmung der harmonischen Lösung für eine Kräfteanregung wird in einem abschließenden Postprocessing die STI mithilfe eines

Python-Skriptes automatisiert über Gleichung (1) im Centroid jedes Elements berechnet.

Im Falle einer experimentellen Bestimmung der STI können die Strukturgrößen nur an der Bauteiloberfläche gemessen werden, sodass die vereinfachte Betrachtung des zweidimensionalen Energieflusses, Gleichung (2) und (3), herangezogen wird. Bei Kunststoffen muss hierbei beachtet werden, dass diese ein viskoelastisches Verhalten aufweisen und das E-Modul $\underline{E}(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega)$ somit als komplexer Wert definiert ist und sich über der Frequenz ändert. Die Beschreibung des frequenzabhängigen Materialverhaltens erfolgt über eine Prony Reihe mit der der Speichermodul E' sowie der Verlustmodul E'' des Kunststoffs bestimmt werden [6]. Die Materialdämpfung $\tan(\delta)$ berechnet sich bei Kunststoffen aus dem Quotienten von Verlust- und Speichermodul und übersteigt die Materialdämpfung von Stahl deutlich [2].

Das anisotrope Materialverhalten wird in den Gleichungen (2) und (3) berücksichtigt indem der Ansatz zur Mischungsnachstellung aus Digimat angewandt wird. Die Mischung beruht auf der Berechnung nach Eshelby [7]. Als Ergebnis ist eine Steifigkeitsmatrix \mathbf{C}_t , die ein viskoelastisches, transversalisotropes Materialverhalten beschreibt. Für die Berechnung der STI wird die Steifigkeitsmatrix \mathbf{C}_t

$$\mathbf{C}_t = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} [C_{11}] & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} [C_{12}] & 0 [C_{13}] \\ & \frac{1}{E_y} [C_{22}] & 0 [C_{23}] \\ sym. & & \frac{1}{G_{xy}} [C_{33}] \end{bmatrix} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

auf den ebenen Spannungszustand reduziert. Über eine Prozesssimulation werden die Faserausrichtungen in den Bauteilen sowohl für die Simulation als auch für die Messung mittels Drehwinkel beschrieben. Mit Hilfe der Drehwinkel kann eine Transformationsmatrix \mathbf{T}_t aufgestellt werden. Das Produkt aus Steifigkeitsmatrix \mathbf{C}_t und Transformationsmatrix \mathbf{T}_t liefert die Steifigkeitsmatrix \mathbf{C}_a für anisotropes Materialverhalten [8]. Die anisotrope Steifigkeitsmatrix \mathbf{C}_a weist keine Stellen auf, die unbesetzt sind. Ferner können die Komponenten nicht direkt über Materialgesetze beschrieben werden. Zur Implementierung des anisotropen Verhaltens müssen deshalb die Gleichungen zur Berechnung der Schnittmomente M_x, M_y, M_{xy}

$$M_x = C_{11} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + C_{12} \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + 2C_{13} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial y} \quad [\text{Nm}] \quad (4)$$

$$M_y = C_{21} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + C_{22} \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + 2C_{23} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial y} \quad [\text{Nm}] \quad (5)$$

$$M_{xy} = C_{31} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + C_{32} \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + 2C_{33} \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial y} \quad [\text{Nm}] \quad (6)$$

erweitert werden [8]. Die Querkräfte Q_x

$$Q_x = \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial M_x}{\partial x} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

und Q_y

$$Q_y = \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} \quad [\text{N}] \quad (8)$$

werden über das Momentengleichgewicht bestimmt [9]. Innerhalb des Projekts Akustik-STRUKT werden die Gleichungen (4) – (8) in Matlab implementiert und mittels virtueller Daten aus der numerischen Simulation in Abaqus verifiziert. Im nächsten Schritt erfolgt eine Validierung, wobei Simulationsergebnisse und Ergebnisse aus experimentell ermittelten Daten gegenübergestellt werden.

Modellbildung

Zum Zweck der Validierung wird ein Demonstratorbauteil für eine Fallstudie konzipiert und über einen Spritzgießprozess gefertigt. Abbildung 1 zeigt das Demonstratorbauteil mit den äußeren Abmessungen. Die Einspritzrichtung des Kunststoffs während der Herstellung ist mit roten Pfeilen markiert und maßgeblich für die Orientierung der Fasern innerhalb des Bauteils verantwortlich.

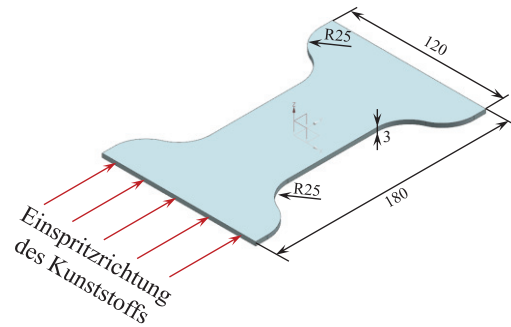


Abbildung 1: Demonstratorbauteil mit äußeren Abmessungen und Einspritzrichtung für den Kunststoff während der Herstellung

Die Komponente ist aus einem Polyamid 6 (PA6) hergestellt, welches mit einem Langglasfaseranteil von 30% des Gesamtgewichts verstärkt ist. Der sich ergebende Faserausrichtungstensor lässt sich über die Prozesssimulation in Moldflow ermitteln, siehe Abbildung 2.

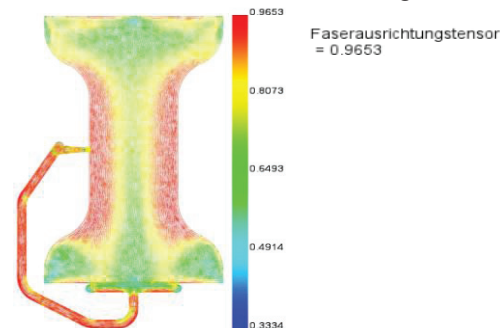


Abbildung 2: Faserausrichtungstensor des Demonstratorbauteils

Das Schwingverhalten der Komponente wird mittels eines experimentellen Modells untersucht. Korrespondierend zum experimentellen Modell wird außerdem ein numerisches FE-Strukturmodell aufgebaut. Im folgenden Abschnitt werden das experimentelle und das numerische Modell genauer erläutert.

Experimentelle Modellbildung

Den vollständigen Aufbau des experimentellen Modells zeigt die Abbildung 3. Das Demonstratorbauteil wird mittig auf einem elektrodynamischen Shaker mittels einer Schraube festgeklemmt. Die Erfassung der Messdaten erfolgt mit einem 3D-Scanning-Laservibrometer (3D-SLDV) PSV 500 der Firma Polytec, wobei drei Scanköpfe (top, left, right) verwendet werden. Da für die Berechnung der STI aus den Messdaten die Phasenbezüge notwendig sind, wird zusätzlich die Schwingschnelle auf der Rückseite der Komponente an einem weiteren Messpunkt mittels eines Einpunkt-Laservibrometers (LDV OFV 302) erfasst und als Referenzkanal an den Controller des PSV 500 übergeben. Der elektrodynamische Shaker (TIRA TV 51110) wird durch den Leistungsverstärker (TIRA BAA 60) versorgt. Über den Generatorausgang des PSV 500 wird das Bauteil mit verschiedenen Signalen (z. B. Periodic-Chirp, Sinus) angeregt.

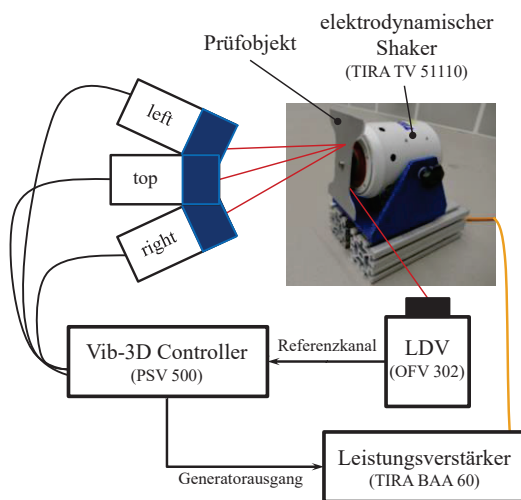
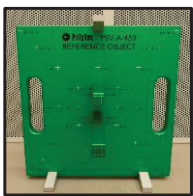


Abbildung 3: experimenteller Messaufbau

Für die Ermittlung von Messdaten mit hoher Qualität wird zunächst ein 3D-Abgleich auf einem Referenzobjekt mit bekannten Abgleichkoordinaten durchgeführt. Die Abbildung 4 zeigt das für den 3D-Abgleich verwendete Referenzobjekt PSV-A-450. In der Tabelle auf der rechten Seite von Abbildung 4 sind die erreichten Genauigkeiten für die drei Scanköpfe (top, left, right) aufgelistet.



| Genauigkeit 3D-Abgleich | | |
|-------------------------|--------|--------|
| top | left | right |
| 0,1 mm | 0,2 mm | 0,1 mm |

Abbildung 4: 3D-Abgleich des 3D-SLDV; links: Abgleichobjekt PSV-A450; rechts: Genauigkeit des 3D-Abgleichs für die drei Scanköpfe (top, left, right)

Für die weiterfolgenden Untersuchungen werden spezifische Resonanzfrequenzen ausgewählt, für die die STI ermittelt und untersucht wird. Zu diesem Zweck wird das Demonstratorbauteil mit einem Periodic-Chirp angeregt und die Schwinggeschwindigkeiten auf der Oberfläche des Bauteils für ein grobes Messgitter erfasst. Anschließend wird eine Resonanzfrequenz ausgewählt bei denen das Demonstra-

torbauteil mit einer reinen Sinusanregung vermessen wird. Für diese Untersuchung wird des Weiteren ein wesentlich feineres quadratisches Messgitter mit einem Messpunkt-Abstand von 2 mm verwendet. Auf diese Weise werden die Schwinggeschwindigkeiten und die zugehörigen Verschiebungen auf der Oberfläche des Demonstratorbauteils an 3357 Messpunkten erfasst. Diese Daten werden im folgendem für eine Berechnung der STI weiterverwendet.

Numerische Modellbildung

Im numerischen Modell wird die Geometrie aus dem Experiment nachgebildet. Die Randbereiche, die in der Messung nicht erfasst werden konnten, werden ebenfalls in der Simulation mit betrachtet. Eine Halterung erfolgt mittig durch die Unterbindung aller 6 Freiheitsgrade. Um die Einspannung herum greift die Kraft, ausgelöst durch den Shaker an. Die angreifende Kraft erhält hierbei die gleiche Größe, wie in der Messung.

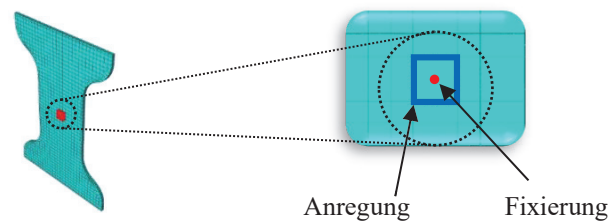


Abbildung 5: Randbedingungen der Simulation

Aufgrund des bereits beschriebenen viskoelastischen Materialverhaltens und des frequenzabhängigen E-Moduls können in der Simulation die Eigenfrequenzen nicht über eine numerische Modalanalyse bestimmt werden. Abhilfe schafft hierbei eine Betriebsschwingungssimulation über den Frequenzbereich von 0–3000 Hz, bei der die Resonanzfrequenzen aus Peaks in den Beschleunigungssignalen bestimmt werden.

Im nächsten Schritt erfolgt eine weitere Betriebsschwingungssimulation in den Resonanzfrequenzen. Hierdurch können die Berechnungszeit und die Datenmenge drastisch reduziert werden im Vergleich zu einer STI-Berechnung über den kompletten Frequenzbereich.

Gegenüberstellung Simulation und Messung

Für die Gegenüberstellung wurde aus der Messung eine Frequenz von 1479 Hz verwendet. In der Simulation konnte durch eine Betriebsschwingungsanalyse eine Schwingfrequenz von 1482 Hz ermittelt werden. Zur ersten Beurteilung, ob die Resonanzfrequenzen das gleiche Schwingverhalten aufweisen, wurden der Real- und Imaginärteil der Verschiebungen sowie die Phase betrachtet. Basierend auf Abbildung 6 lässt sich erkennen, dass sowohl in der Messung als auch in der Simulation dieselbe Schwingform betrachtet wird, sodass im nächsten Schritt die STI verglichen werden kann.

Abbildung 7 zeigt die Gegenüberstellung des Real- und Imaginärteils der STI $\mathbf{I}(f) = (I_x, I_y)$. Der Realteil (aktive STI) beschreibt die an einem Ort fließende Energiemenge [3]. Von der Anregungsstelle verläuft die Energie zunächst quer und strebt zu den Rändern. Von dort breitet sie sich entlang des Randes in positiver und negativer Längsrichtung aus. Zudem sind auf der rechten Seite des Bauteils höhere

Energieanteile erkennbar. Durch den Imaginärteil (reaktiver Teil) wird der oszillierende Anteil der Energie beschrieben [3]. Ausgehend von der Anregung ist eine Energieverteilung in Form eines Dreiecks in Querrichtung bis zu den Rändern des Demonstrators erkennbar. Hier lassen sich auf Höhe der Anregungsposition am Rand kleine Bereiche mit niedrigen Energieanteilen ausmachen. Wie im aktiven Teil sind die höheren Energieanteile zur rechten Seite des Demonstrators verlagert. In der Messung lassen sich zudem erhöhte Energieanteile, die zu den Ecken des Bauteils streben, erkennen.

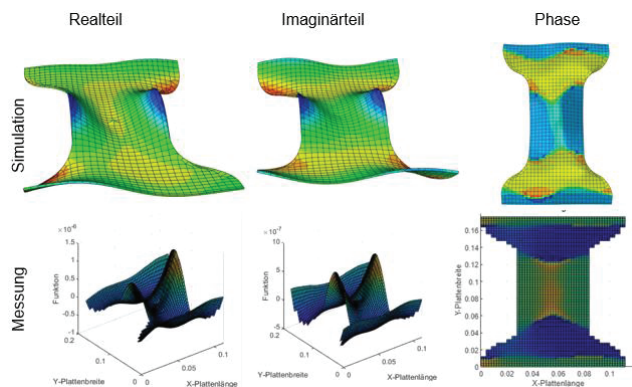


Abbildung 6: Realteil, Imaginärteil und Phase der Bauteilschwingung

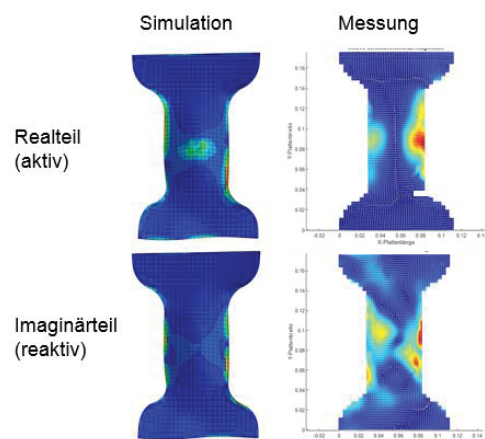


Abbildung 7: Darstellung der komplexen STI

Schlussfolgerung

Durch die Gegenüberstellung von Messung und Simulation konnte gezeigt werden, dass die integrative Berechnungsmethode geeignet ist, das Schwingverhalten spritzgegossener, faserverstärkter Kunststoffe zu simulieren. Für die Messung der STI konnten die Berechnungsgleichungen auf den allgemeinen Fall des anisotropen Materialverhaltens umformuliert werden. Da die nötigen Materialdaten zur Berechnung der STI abhängig sind von der Anregungsfrequenz und aufgrund der Faserorientierung im Bauteil stark differieren, kann durch Nutzung der integrativen Berechnungsmethode jedem Messknoten ein separates Materialmodell zugewiesen werden. Die bisher erzielten Abgleiche geben Raum zur weiteren Verbesserung. Der verwendete Kunststoff PA6 zeigt in Abhängigkeit vom Umgebungsklima ein hygroskopisches Verhalten, das sich in einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften widerspiegelt. Für die Berechnung wurden die Kennwerte des Materialdatenblatts

verwendet. Weiteres Potential zur Verbesserung bietet das Dämpfungsverhalten der Materialien. Stahl weist einen geringen mechanischen Verlustfaktor auf, sodass ein komplexes E-Modul die messtechnische Berechnung der STI unwesentlich beeinflusst. Wie bereits angemerkt, weisen Kunststoffe eine höhere Dämpfung auf. Es soll überprüft werden, inwieweit eine Berücksichtigung der Dämpfung die Ergebnisse der STI beeinflusst. Angemerkt werden soll zudem, dass die Faserverstärkung nur einen Teilbereich darstellt, das mechanische Verhalten spritzgegossener Kunststoffe zu optimieren. Zu den weiteren Teilbereichen zählt beispielsweise das mikrozelluläre Schäumen. Aufgrund der hohen Komplexität sollten Untersuchungen in weiteren Bereichen Gegenstand eines weiteren Forschungsprojekts darstellen.

Danksagung

Die beschriebenen Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Akustik-STRUKT - Integrative Auslegung von Leichtbauteilen mit Hilfe der Strukturintensitätsanalyse zur Erzielung guter akustischer Eigenschaften unter Berücksichtigung des Einsatzes, Optimierung und Entwicklung faserverstärkter Kunststoffe“ durchgeführt. Das Projekt wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert. Neben der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn und dem Kunststoff-Institut in Lüdenscheid sind die KOSTAL Automobil Elektrik GmbH Co. KG in Lüdenscheid, die MöllerTech GmbH in Bielefeld und die Ter Hell Plastic GmbH in Herteln Projektpartner.

Literatur

- [1] Genuit, K.: Sound Engineering im Automobilbereich, Springer Verlag, 2010
- [2] Gieß, M.: Untersuchung zur akustischen Formteilauslegung, Dissertation, Shaker Verlag, 2019
- [3] Hering, T: Strukturintensitätsanalyse als Werkzeug der Maschinenakustik, Dissertation, TU-Darmstadt, 2012
- [4] Heckl M., Crämer L.: Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, 3. Auflage, Springer Verlag, 2010
- [5] Gieß, M. und Netzband, D.: Integrierte Simulationemethode für die akustische Formteilauslegung, Vortrag auf der MSC-Software-Conference, Berlin, 24-26.10.2017
- [6] Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual Volume III: Materials, Dassault Systèmes, 2012
- [7] E-Xstream, Digimat User's Manual, MSC-Software, 2019
- [8] Technische Universität Berlin, Mechanik der Faserverbundwerkstoffe (Abrufdatum: 10.12.2020): http://svfs.ifm.tu-berlin.de/der_ebene_spannungszustand.html
- [9] Ehrlich, I.: Impactverhalten schwach gekrümmter Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2004