

# Akustische Formteilauslegung

Michael Gieß<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fachhochschule Südwestfalen, 58644 Iserlohn, E-Mail: [giess.michael@fh-swf.de](mailto:giess.michael@fh-swf.de)

## Einleitung

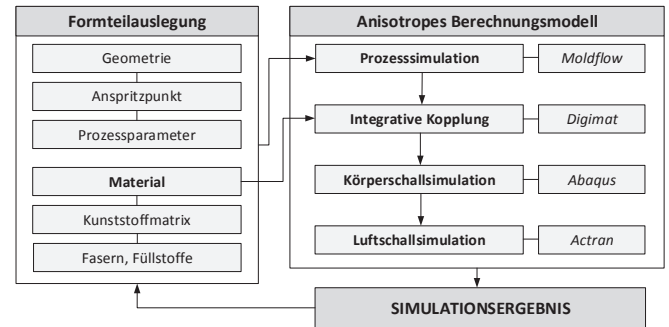
Komponenten des Fahrzeuginterieurs wie z. B. Instrumententafeln, Mittelkonsolen oder Handschuhkastenfächer übertragen durch Anregung von außen oder durch innere Geräuschbildung die Schwingungen als Körperschall durch ihre Struktur und strahlen sie als Luftschall an den Fahrzeuginnenraum ab. Die Herstellung derartiger Komponenten erfolgt üblicherweise durch das urformende Fertigungsverfahren des Spritzgießens, bei dem der thermoplastische Kunststoff in einer Plastifiziereinheit aufgeschmolzen wird und in einen Formnesthohlraum eines Spritzgießwerkzeuges geleitet, komprimiert und dann nach dem Erstarren ausgeworfen wird. Eine kunststoff- und fertigungsgerechte Auslegung dieser Formteile erfolgt unter Berücksichtigung von bekannten Gestaltungsrichtlinien der Kunststofftechnik und oftmals durch eine begleitende Prozesssimulation, mit der beispielsweise Bindenähte, Einfallstellen oder Faserorientierungen in den Formteilen vorab berechnet werden können.

Die „akustische“ Formteilauslegung berücksichtigt die Anisotropie (z. B. aufgrund von Faserorientierungen) und das viskoelastische Materialverhalten der Kunststoffmatrix durch einen integrativen Simulationsansatz. Die integrative Simulation ist inzwischen zum Stand der Technik für die strukturmechanische Auslegung von Leichtbauteilen geworden, auch für die akustische Simulation von kurzglasfaserverstärkten Kunststoffbauteilen gibt es bereits Ansätze, siehe z. B. [1] bis [5].

## Integrativer Simulationsansatz

Durch Kombination und Kopplung der kommerziell erhältlichen und weit verbreiteten Simulationssoftware Moldflow bzw. Moldex3D, Digimat, Abaqus sowie Actran wird ein integrativer Simulationsansatz mit einem anisotropen Berechnungsmodell für die akustische Formteilauslegung realisiert. Im Rahmen der Prozesssimulation wird zunächst mit der Software Moldflow ein Orientierungstensor auf Basis der Folgar-Tucker-Gleichungen berechnet. Erforderlich sind hierfür die Formteilgeometrie, die Lage des Anspritzpunktes, die Prozessparameter sowie die Materialdaten der Kunststoffmatrix und etwaiger Füllstoffe oder Fasern. Eine integrative Kopplung des Orientierungstensors aus der Prozesssimulation (Moldflow) mit der Körperschallsimulation (Abaqus) erfolgt über ein sogenanntes Mapping in der Software Digimat. Zudem werden mit Digimat digitale Materialmodelle und Materialkarten auf der Basis von experimentell zu ermittelnden oder virtuellen Materialdaten modelliert. Die FE-Berechnungen der Körperschallsimulation in Abaqus werden anschließend noch mit einer Luftschallsimulation in Actran gekoppelt, um zusätzliche akustische Phänomene wie z. B. Impedanzen zu berücksichtigen. Mit den Ergebnissen der Akustiksimulation

können die Formteile durch Änderung ihrer Parameter wie Material, Lage des Anspritzpunktes etc. iterativ ausgelegt werden (siehe Abb. 1).



**Abbildung 1:** Integrierte Simulationsmethode für die akustische Formteilauslegung [6].

## Materialdaten

Für die Materialmodelle werden reale Daten benötigt, die durch verschiedene Materialprüfungen ermittelt werden. Der Elastizitätsmodul  $E_\infty$  und die Querkontraktionszahl  $\nu$  werden durch Zugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 527 sowie die Dichte  $\rho$  nach DIN EN ISO 1183-1 bestimmt. Das viskoelastische Materialmodell für die Kunststoffmatrix benötigt frequenzabhängige Materialdaten für den Speichermodul  $E'(\omega)$  und den Verlustmodul  $E''(\omega)$  des komplexen Elastizitätsmoduls bzw. für den mechanischen Verlustfaktor  $\tan \delta(\omega)$ . Gemessen werden diese Materialdaten durch eine dynamisch-mechanische Analyse (DMA) in Anlehnung an DIN EN ISO 6721. Bei der Messung wird in dem verwendeten DMA-Messgerät die Materialprobe durch eine sinusförmige Kraft mit den Frequenzen 1, 2, 5 und 10 Hz in einem Temperaturbereich von  $-100$  bis  $+100^\circ\text{C}$  bzw.  $+150^\circ\text{C}$  bei einer Dreipunktbiegung belastet. Es werden Masterkurven für einen größeren Frequenzbereich durch Inter- und Extrapolation mit Hilfe des Zeit-/Temperatur-Verschiebungsprinzips (ZTV-Prinzip) erzeugt. Experimentelle Versuche ergaben jedoch, dass die gewonnenen DMA-Daten der Kunststoffmatrix nicht direkt verwendet werden können, sondern für eine Körperschallsimulation vorher noch kalibriert werden müssen.

## Kalibrierung

Eine Kalibrierung der DMA-Messdaten erfolgt, indem die DMA-Masterkurve für den Speichermodul am extrapolierten Wert  $E'(0,1 \text{ Hz})$  auf den in dem Zugversuch gemessenen Wert des Elastizitätsmoduls  $E_\infty$  verschoben wird [5]. Auch die DMA-Masterkurve des Verlustmoduls muss noch durch einen Korrekturfaktor angepasst werden. Für den teilkristallinen Kunststoff Polypropylen (PP) stellte sich dabei experimentell der nachfolgende Korrekturfaktor  $k_{DMA}$  unter Berücksichtigung der Glasübergangstemperatur  $T_g$  und der

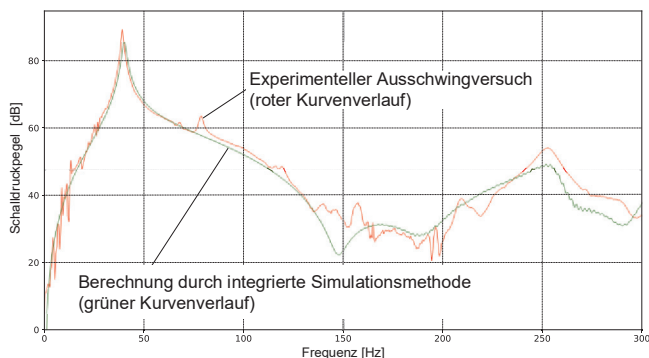
Gebrauchstemperatur  $T$  (für  $T > T_g$ ) des Materials dar, siehe Gleichung (1):

$$k_{DMA}(T_g, T) = \left(\frac{T_g}{T}\right)^2 \quad [-] \quad (1)$$

Für die Verwendung in der Simulationssoftware müssen diese kalibrierten und korrigierten linear-viskoelastischen DMA-Materialdaten noch mathematisch in sogenannte Prony-Reihen umgewandelt werden. Die Prony-Analyse ist eine Technik, um sinusförmige oder exponentielle Signale aus einer Zeitserie in eine lineare Summe exponentieller Funktionen zu extrahieren. Der Vorteil dabei ist, dass die geschätzten Prony-Dämpfungskoeffizienten unabhängig von Frequenz, Phase und Amplitude sind. In den verwendeten Simulationsprogrammen wie Abaqus oder Digimat wird diese Prony-Reihenentwicklung beispielsweise unter Berücksichtigung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate durch Kurvenanpassung automatisiert durchgeführt. Für eine Kalibrierung empfiehlt sich der Durchlauf von mehreren Körperschallsimulationen mit Variation in der Anzahl der Prony-Parameter und einem gleichzeitig experimentellen Abgleich.

## Verifizierung der Simulationsmethode

Die zuvor beschriebene Simulationsmethode wurde mit plattenförmigen, anisotropen Formteilen mit gefüllten, geschäumten oder faserverstärkten Materialien auf Basis der Kunststoffmatrix PP und ABS anhand von experimentellen Ausschwingversuchen verifiziert. Es wird ein quadratisch zugeschnittenes Formteil an der Oberkante fest in eine massive Vorrichtung, die sich in einer schallgedämpften Akustikkabine befindet, eingespannt, mit einem Impulshammer beaufschlagt und gleichzeitig mit einem Mikrofon gemessen. Jede quadratische Materialprobe wird sowohl in Hauptfließrichtung ( $0^\circ$ ) als auch quer zur Hauptfließrichtung der Kunststoffschmelze ( $90^\circ$ ) eingespannt und mehrmals geprüft. Die Ergebnisse der integrierten Simulationsmethode stimmen bei diesen einfachen Formteilgeometrien und niedrigen Frequenzen bis ca. 300 Hz durchschnittlich zu 90% mit der Realität überein (siehe Abb. 2). Insgesamt konnten über 50% an Zeit für Berechnungen, Kalibrierungen und akustischen Prüfungen gegenüber konventionellen Simulationsmethoden eingespart werden.



**Abbildung 2:** Akustischer Vergleich zwischen Simulation und experimentellem Ausschwingversuch (Materialprobe: PP-GF40,  $90^\circ$ -Orientierung)

## Zusammenfassung und Ausblick

Das akustische Verhalten eines Bauteils kann konstruktiv sowohl durch die Änderung seiner Makrostruktur (größere Geometrieänderung wie z. B. Einbringen von zusätzlichen Steifigkeitsrippen, -sicken oder von Belägen und Filzen am Bauteil) als auch durch die Änderung seiner Mikrostruktur (Änderung des Materials und dessen Orientierung) beeinflusst werden. Häufig kann die Makrostruktur der Bauteile nicht geändert werden, da die vorgegebenen Bauräume in der Konstruktion oftmals stark begrenzt sind. Mit der zuvor beschriebenen, integrierten Simulationsmethode kann der Konstrukteur sein Formteil unter Berücksichtigung der Anisotropie und dem viskoelastischen Materialverhalten realitätsnah simulieren und durch Änderungen in der Mikrostruktur iterativ auslegen. Grundsätzlich bietet der integrative Simulationsansatz auch die Möglichkeit neue Werkstoffe digital zu entwickeln. Ad interim könnte virtuell eine iterative Materialentwicklung und danach eine reale Compoundierung und Abmusterung der Formteile erfolgen. Mit diesen neuen Materialien könnte die akustische Qualität von Produkten und Komponenten aus Kunststoff weiter verbessert werden.

## Danksagung

Das Forschungsprojekt „Akustik-OPT - Gezielte Materialentwicklung durch Einsatz der Anisotropie und Viskoelastizität von Kunststoffen zur Optimierung des akustischen Verhaltens von Leichtbauteilen“ wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und dem Land NRW gefördert. Die Projektpartner sind neben der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn das Kunststoff-Institut in Lüdenscheid, die Leopold Kostal GmbH & Co. KG in Lüdenscheid, die MöllerTech GmbH in Bielefeld und die Ter Hell Plastic GmbH in Herteln.

## Literatur

- [1] Schmachtenberg, E.; Krumpholz, T.; Franck, A.; et al.: Akustik von Kunststoffbauteilen. *Kunststoffe* (2004), Nr. 09, S. 230–235
- [2] Arping, T.: Werkstoffgerechte Charakterisierung und Modellierung des akustischen Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe für Körperschallsimulationen. Dissertation RWTH Aachen 2010.
- [3] Lichius, U.; Gieß, M.: Der Computer hört mit. *Kunststoffe* (2016), Nr. 04, S. 101–104
- [4] Brandt, P.; Hopmann, C.: Der Klang von Kurzglasfasern in Kunststoffen. *Kunststoffe* (2016), Nr. 05, S. 73–76
- [5] Calmels, S.; Lesueur, M.: Anisotropic damping Behavior of reinforced Plastic Parts for NVH simulations. 16th Annual SPE Automotive Composites, Novi, MI, USA, 2016.
- [6] Gieß, M.: Untersuchungen zur akustischen Formteileauslegung. Dissertation Universität Siegen, 2018.