

Schwingungsverhalten von 3D gedruckten Bauteilen übertragen

Rainer Haas¹, Benjamin Kasulke¹

¹ TH-Köln, NVH-Lab, 50679 Köln, E-Mail: Rainer.Haas@th-koeln.de

Einleitung

Die Vorhersage des dynamischen Verhaltens von Gehäusebauteilen ist ein Schlüsselfaktor in der Entwicklung mit Blick auf Dauerhaltbarkeit, akustisches Verhalten und Gewicht. Insbesondere in der Fahrzeugindustrie ist der Gewichtseinfluss direkt mit der Effizienz des Fahrzeuges verbunden.

Im FDM Verfahren hergestellte 3D Kunststoffbauteile können in der Entwicklung zu einem frühen Zeitpunkt erstellt werden. Bezogen auf die Vorhersage des Schwingungsverhaltens ergibt sich die Fragestellung, ob ausgehend vom gedruckten Kunststoffbauteil das Verhalten des finalen Metallteils vorhersagbar ist und insbesondere Aussagen über die Dämpfung der jeweiligen Bewegungsformen getroffen werden können.

Summary

Is it possible to predict dynamic behavior of metal parts based on 3D printed (multi-jet) rapid prototype parts? Can we assign different natural frequencies, associated damping and motion between production part and its 3D prototype? Are motions comparable enough to locate rigid areas for specific frequencies?

Prediction of dynamic behavior of machine parts and housings is an essential key factor during development process with significance to durability, acoustic behavior and structural weight of a specific part or even the whole product. Due to the weight influence it is subsequently connected to efficiency in addition, especially when used in transportation. Moving this task to an early point can also avoid additional product cycles with an immense influence on timing itself.

Theoretischer Hintergrund und Idee

Ändert man für ein bestehendes Bauteil das Material, so verändern sich abhängig von Biegesteifigkeit, Dichte beziehungsweise Massebelegung und von der Strukturdämpfung die schwingungstechnischen Eigenschaften.

Durch die genannten Parameter sind maßgeblich festgelegt die Eigenfrequenz und das zugehörige Übertragungsmaß der entsprechenden Modenform.

Zielsetzung dieser Untersuchung ist es, die Übertragung der schwingungstechnischen Eigenschaften für Plattenstrukturen zu untersuchen. Auf Basis der Plattentheorie nach Kollmann [1] können Eigenfrequenzen und Übertragungsmaß (siehe auch Kremer und Heckl [2]) in Abhängigkeit des Materials und der Geometrie berechnet werden. Betrachtet man homogene, isotrope Materialien, so ist damit für eine einfache Plattenstruktur das schwingungstechnische Verhalten auf Basis von Messgrößen für einen Materialwechsel vorhersagbar. Insbesondere die

Eigenschaft der Isotropie ist für 3D gedruckte Kunststoffbauteile allerdings zu diskutieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für eine solche Übertragung die Qualität der Ergebnisse beurteilt.

Materialien und Herstellungsverfahren

Als Herstellungsverfahren der Druckbauteile wird aufgrund der geringen Kosten ein Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren gewählt. Der Aufbau des Modells erfolgt schichtweise durch Verflüssigung eines Kunststoffdrahtes. Bei dem eingesetzten Material handelt es sich um Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS). Vergleichsstrukturen aus ABS-Vollmaterial, Stahl und Aluminium werden durch spanende Herstellungsverfahren erzeugt.



Abbildung 1: Untersuchte Plattenstrukturen aus Stahl¹, Aluminium², Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)³ und 3D Druck ABS⁴⁵

Strukturmechanische Eigenschaften von Plattenstrukturen

Maßgeblich für das Körperschallverhalten von Bauteilen, die aus zusammengesetzten Plattenstrukturen bestehen sind Biegewellen. Es wird daher auf die einfache Theorie ohne Berücksichtigung von Longitudinal- und Schubwellen zurückgegriffen.

$$f_{e1} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{1}{S} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \mu^2)}} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

Darin ist S die Plattenfläche, E das Elastizitätsmodul, μ die Querkontraktion und ρ die Dichte des Materials. Der Faktor K_1 berücksichtigt das Breiten-Längen Verhältnis, der Faktor K_2 die Art der Plattenlagerung und K_3 die wirksame Plattendicke.

Zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens wird auf das Abschätzverfahren für die Übertragungsadmittanz im Eigenonbereich zurückgegriffen.

$$Sh_{0,e}^2 = \frac{\pi^2}{512} \cdot \frac{1}{f \cdot \eta_{Str} \cdot m' \sqrt{m' B'}} \quad [\text{s}^2 \text{m}^2 / \text{kg}^2] \quad (2)$$

Darin ist f die gewählte Frequenz im Eigenonbereich und η_{Str} die Strukturdämpfung. Ersetzt man die Massebelegung

$$m' = \rho \cdot h \quad [\text{kg/m}^2] \quad (3)$$

und die Biegesteifigkeit

$$B' = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)} \quad [\text{Nm}] \quad (4)$$

so ergibt sich im Eigenonbereich unabhängig von der Plattenfläche:

$$Sh_{0,e}^2 = \frac{\pi^2 \sqrt{12}}{512} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{\eta_{Str}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \mu^2}}{\rho^{\frac{3}{2}} \cdot h^3 \cdot \sqrt{E}} \quad [\text{s}^2 \text{m}^2 / \text{kg}^2] \quad (5)$$

Konzept der Übertragung

Die Relation der Eigenfrequenzen zweier Platten aus unterschiedlichem Material kann dann durch einen Faktor beschrieben werden. Gleiches gilt für die Relation der Übertragungsadmittanzen.

Berücksichtigt man die identische Geometrie der untersuchten Platten, so ergibt sich:

$$\frac{f_e^*}{f_e} = \sqrt{\frac{E^* \rho (1 - \mu^2)}{E \rho^* (1 - \mu^{*2})}} \quad [-] \quad (6)$$

$$\frac{Sh_{0,e}^{2*}}{Sh_{0,e}^2} = \frac{f}{f^*} \cdot \frac{\eta_{Str}}{\eta_{Str}^*} \cdot \frac{\sqrt{1 - \mu^{*2}} \cdot \rho^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{E}}{\sqrt{1 - \mu^2} \cdot \rho^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{E^*}} \quad [-] \quad (7)$$

Für die untersuchten Eigenfrequenzen kann das Verhältnis f/f^* entsprechend ersetzt werden und es gilt:

$$\frac{Sh_{0,e}^{2*}}{Sh_{0,e}^2} = \frac{\sqrt{E^* \rho^* (1 - \mu^{*2})}}{\sqrt{E \rho (1 - \mu^2)}} \cdot \frac{\eta_{Str}}{\eta_{Str}^*} \cdot \frac{\sqrt{1 - \mu^{*2}} \cdot \rho^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{E}}{\sqrt{1 - \mu^2} \cdot \rho^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{E^*}} \quad [-] \quad (8)$$

$$\frac{Sh_{0,e}^{2*}}{Sh_{0,e}^2} = \frac{\eta_{Str} E \rho}{\eta_{Str}^* E^* \rho^*} \cdot \frac{(1 - \mu^{*2})}{(1 - \mu^2)} \quad [-] \quad (9)$$

Messobjekte und Messung

Als Messobjekte dienen Platten aus Stahl, Aluminium und Kunststoff in herkömmlich produzierter und gedruckter Form. Die maßgeblichen Materialkennwerte können Tabelle 1 entnommen werden. Aufgrund des großen Streubereiches, insbesondere beim Elastizitätsmodul des Kunststoffes ist folgerichtig eine deutliche Streuung der Ergebnisse zu erwarten.

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Materialien

| Material | Stahl | Aluminium | ABS |
|---------------------------|-------|-----------|---------|
| Dichte /kg/m ³ | 7850 | 2700 | 1040 |
| E-Modul /GPa | 210 | 70 | 1,9-2,7 |

Voruntersuchungen an rechteckigen Platten haben Fragestellung zur Frequenz symmetrischer Modenformen in Abhängigkeit des verwendeten Druckverfahrens aufgeworfen. Daher wurde die vorliegende Untersuchung für rechteckige Platten durchgeführt. Auswirkungen verschiedener Herstellungsabfolgen werden für zwei unterschiedliche Druckmuster, kreuzweise linearer und diagonaler Materialauftrag, untersucht (Abbildung 2). Die verwendeten Platten sind 150x150 mm groß und 5 mm dick.

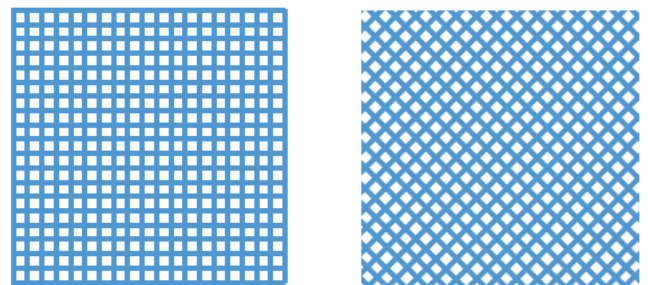


Abbildung 2: Verschiedene Druckmuster der Acrylnitril-Butadien-Styrol Platten (ABS), linear und diagonal.

Im Vergleich zum Grundmaterial (siehe Tabelle 1) ergibt sich eine geringere Dichte bezogen auf die Plattengeometrie für die gedruckten Platten. Werte hierzu können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Materialeigenschaften der gedruckten Kunststoffbauteile

| Material | ABS | ABS-Druck linear | ABS-Druck diagonal (DD) |
|------------------------------------|------|------------------|-------------------------|
| Mittlere Dichte /kg/m ³ | 1040 | 756 | 702 |
| E-Modul /GPa | 210 | 70 | 1,9-2,7 |

Messtechnisch wird für jede der Platten eine Modalanalyse durchgeführt. Das Messgitter hat 7x7 Punkte und somit einen Knotenabstand von 25 mm in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Platten sind zur Messung elastisch aufgehängt. Die Anregung erfolgt durch einen Modalhammer, als Beschleunigungsmesspunkt wird Punkt 33 gewählt (siehe Abbildung 3).

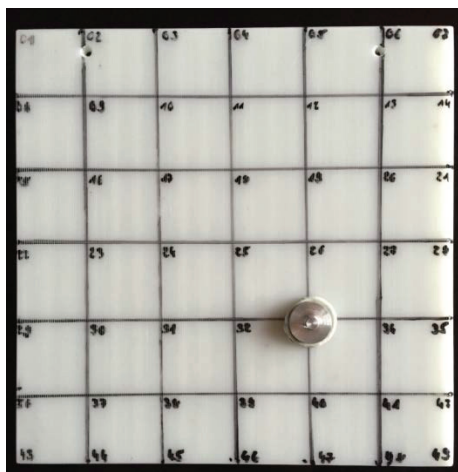


Abbildung 3: Messgitter und Beschleunigungsmesspunkt.

Mess- und Rechenergebnisse

Nach Formel 6 ergeben sich rechnerisch folgende Faktoren für die Übertragung der Eigenfrequenzen:

- Alu/Stahl: 0,99
- ABS/Stahl 0,26-0,32

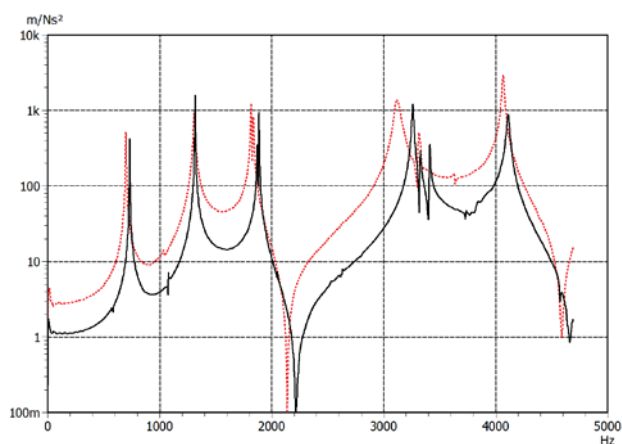


Abbildung 4: Akzeleranz (Beispielhaft, Beschleunigung P33 / Anregung P01) für Stahl (schwarz) und Aluminium (rot, gestrichelt).

Abbildung 4 zeigt die gute Übereinstimmung der Akzeleranz für Stahl- und Aluminiumplatte. Erwartungsgemäß liegt der Frequenzfaktor zwischen 0,95 und 1,00 und mit einem Mittelwert von 0,98 recht nahe am zuvor berechneten Wert

Die in Abbildung 5 blau dargestellte Akzeleranz der herkömmlichen ABS-Platte zeigt unter Berücksichtigung der Frequenzverschiebung noch eine gute Vergleichbarkeit zur Stahlplatte. Der Faktor für die Eigenfrequenzen liegt basierend auf den Messungen zwischen 0,23 und 0,29 (Mittelwert: 0,27) ebenfalls nahe am berechneten Wert.

Für die 3D gedruckte ABS-Platte (Abbildung 5 grüne Kurve) ergibt sich ein deutlich uneinheitliches Bild. Die Eigenfrequenzen sind unterschiedlich verschoben, es kommen weitere gemessene Eigenfrequenzen hinzu. Mit einem Faktor zwischen 0,19 und 0,29 (Mittelwert 0,24) ist die gedruckte ABS-Platte etwas weicher. Die im Vergleich zur herkömmlichen Kunststoffplatte größere Abweichung einzelner Faktoren kann ursächlich in der inhomogenität der

Platte begründet liegen. Das beschriebene uneinheitliche Bild gilt für alle gemessenen Übertragungsfunktionen der gedruckten Kunststoffplatte gleichermaßen. Betrachtet man, die auf Basis der Messwerte berechneten Eigenformen, so ist eine recht annehmbare Zuordnung jedoch möglich.

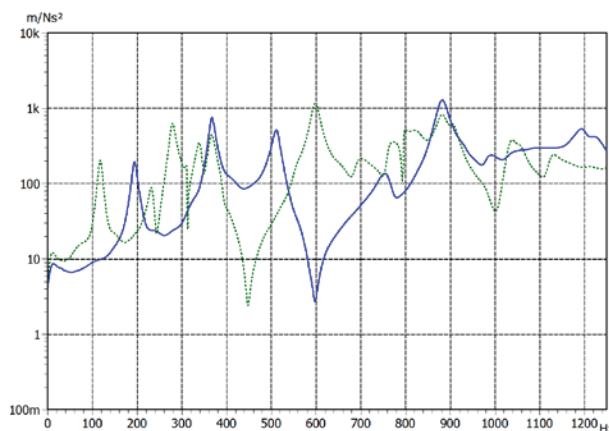


Abbildung 5: Akzeleranz (Beispielhaft, Beschleunigung P33 / Anregung P01) für ABS (blau) und ABS-3D-DD (grün, gestrichelt). Die Achsenskalierung ist entsprechend der zu erwartenden Frequenzverschiebung angepasst.









Eine Finite-Element Rechnung zeigt im Frequenzbereich bis 5 kHz für Stahl und Aluminium 10 Eigenfrequenzen. Der zugehörige Frequenzbereich für den ABS-Kunststoff reicht bis etwa 1250 Hz. Darunter sind zwei symmetrische Modenformen (siehe Tabelle 3, grau hinterlegt). Einen Vergleich der Modenformen zeigt die in Tabelle 4 dargestellte Zuordnung.

Tabelle 3: Auf Basis eines FE-Modelles berechnete Eigenfrequenzen. Die grau hinterlegten Eigenfrequenzen führen jeweils auf symmetrische Eigenformen.

| | | Stahl | Aluminium | ABS-Platte |
|---------------------|-----|-------|-----------|------------|
| Eigenfrequenz in Hz | 1. | 720 | 706 | 202 |
| | 2. | 1051 | 1043 | 299 |
| | 3. | 1269 | 1339 | 394 |
| | 4. | 1844 | 1842 | 529 |
| | 5. | 1847 | 1844 | 529 |
| | 6. | 3212 | 3315 | 967 |
| | 7. | 3214 | 3318 | 968 |
| | 8. | 3360 | 3367 | 969 |
| | 9. | 3668 | 3662 | 1052 |
| | 10. | 4040 | 4170 | 1216 |

Die in der Reihenfolge vertauschte Frequenzlage der Modenformen A-B und F-G liegt innerhalb des zuvor angegebenen Streubereiches für den Frequenzfaktor zwischen Stahl- und ABS-Druck-Platte. Die Ursache für die im Vergleich vertauschte Reihenfolge ist verursacht durch makroskopisch anisotrope Eigenschaften der gedruckten Platten.

Tabelle 4: Darstellung der messtechnisch ermittelten Modenformen, ohne Symmetrische. Die grau hinterlegten Felder kennzeichnen Unterschiede in der Reihenfolge für die ABS-Druck-Platte (DD).

| | Mode | Stahl | Alu | ABS-Platte | ABS-DD |
|-----------------------|---|-------|------|------------|--------|
| Moden: Frequenz in Hz | A  | 731 | 697 | 193 | 210 |
| | B  | 1075 | 1039 | 288 | 195 |
| | C  | 1314 | 1304 | 366 | 304 |
| | D  | 1871 | 1817 | 500 | 477 |
| | E  | 3258 | 3115 | 754 | 617 |
| | F  | 3409 | 3335 | 934 | 935 |
| | G  | 3729 | 3632 | 1027 | 887 |
| | H  | 4110 | 4066 | 1192 | 1011 |

Auch für die im Linear-Druck hergestellte ABS-Platte ergibt sich eine veränderte Abfolge der Modenformen. Diese ist sowohl unterschiedlich im Vergleich zur Stahl- und Aluminiumplatte, als auch im Vergleich zur ABS-Diagonaldruck-Platte. Der im Druckverfahren und dessen Ablauf begründete Effekt konnte für die diagonal gedruckte Platte anhand eines verfeinerten FE-Modelles nachgewiesen werden. Für dieses FE-Modell ergeben sich die in der letzten Spalte der Tabelle 4 dargestellten Eigenfrequenzen mit einer Abweichung von im Mittel 5%.

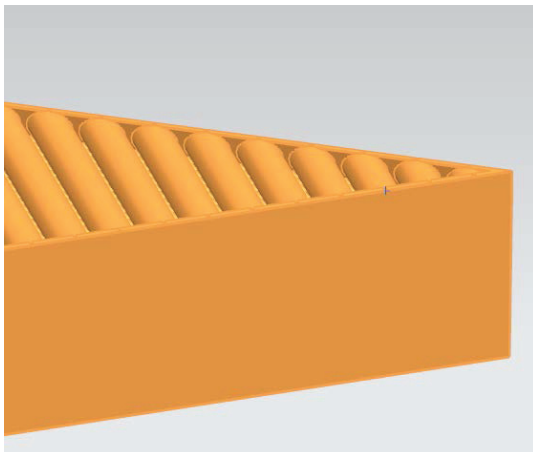


Abbildung 6: Ausschnitt des FE-Modelles für die ABS-Platte im Diagonaldruck.

Gemäß Formel 9 ergibt sich gegenüber der Stahlplatte ein Anstieg der mittleren quadratischen Übertragungsdmittanz von etwa 9 dB für Aluminium und 10-15 dB für ABS-Kunststoff. Der Anstieg und dessen Größenordnung sind plausibel für die gemessenen Übertragungsfunktionen. Da es sich hier um den mittleren Wert handelt kann aber nicht

allgemeingültig auf die Amplituden der Eigenfrequenzen geschlossen werden. Besonders für den Kunststoff ist die modale Dämpfung höher und die Bereiche zwischen den Eigenfrequenzen somit deutlich aufgefüllt.

Die gemessenen modalen Dämpfungen liegen, bezogen auf die Stahlplatte für Aluminium um den Faktor 2,3 höher. Für die herkömmliche Kunststoffplatte ergibt sich ein Faktor von 11,5 und für die diagonal gedruckte ein Faktor von 9,5. Insbesondere für nahe beieinander liegende Moden kommt es zu starken Abweichungen vom genannten Faktor, dieser Effekt ist mit stärkerer modaler Dämpfung deutlicher ausgeprägt und ist auf die stärkere Kopplung benachbarter Moden zurückzuführen.

Zusammenfassung und Ausblick

Gemessene Eigenfrequenzen 3D-gedruckter Kunststoffbauteile mit einfacher Geometrie können mittels eines Faktors auf Stahl- und Aluminiumbauteilen übertragen werden. Der Faktor kann auf Basis des Abschätzverfahrens für das Körperschallverhalten vorausberechnet werden. Streng gilt dies nur für die hier untersuchten Materialien beziehungsweise Herstellungsverfahren und ist für andere Materialien nachzuweisen.

Weichere Modellstrukturen bilden das schwingungstechnische Verhalten des Originalteils innerhalb eines niedrigeren Frequenzbereiches ab. Es ergibt sich damit die Möglichkeit, mit gegebener Messtechnik für das Originalteil auch Bereiche höherer Frequenzen zu beurteilen.

Die im Druckverfahren begründeten makroskopischen anisotropen Eigenschaften der gedruckten Platten führen zu Verschiebungen in der Frequenz der Eigenformen bis hin zum Wechsel der Reihenfolge des Auftretens. Die recht starke Materialdämpfung begünstigt einhergehend eine mögliche starke Kopplung der Modenformen.

Eine Vorausberechnung für die Amplitudenhöhe auf Basis der einfachen Formeln für das Körperschallverhaltens ist nur sehr eingeschränkt möglich. Modale Dämpfungen können mittels Faktor annehmbar umgerechnet werden. Einschränkend wirken die bereits erwähnten starken Kopplungen. Es ist zu erwarten, dass eine komplexe Geometrie ähnliche Auswirkungen auf den Übertragungsfaktor haben wird.

Ausblickend sind Bauteile mit Herstellungsverfahren zu untersuchen, die homogene Bauteile mit makroskopisch isotropen Eigenschaften erzeugen. Materialdämpfung ähnlicher Größenordnung sollte zu einer besser vergleichbaren Modenkopplung führen.

Literatur

- [1] Kollmann, F. G.; Schösser, T. F.; Angert, R.: Praktische Maschinenakustik, Springer Verlag, Berlin, 2006
- [2] Cremer, L.; Heckl M.: Körperschall. Springer Verlag Berlin, 1995
- [3] Kasulke, B.; Vergleich der Modenformen im 3D-Druck und herkömmlich hergestellter Bauteile, Bachelorarbeit TH-Köln, unveröffentlicht, 2015