Diskussion akustischer Bewertungskriterien zur Anwendung in der Topologieoptimierung

Sebastian Rothe[1], Sabine C. Langer[1]

[1] *TU Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik, 38106 Braunschweig, Deutschland*

Email: sebastian.rothe@tu-braunschweig.de

Einleitung

Der Schwingungskomfort und eine verbesserte Akustik sind immer bedeutendere Faktoren bei bei Entwicklung neuartiger Konstruktionen. Ziel ist die frühe und vor allem prognosesichere akustische Vorauslegung der Bauteile bei optimaler Ausnutzung des Materials. Eine oft genutzte mathematische Methode, eine geeignete Bauteilgeometrie unter Berücksichtigung mechanischer und fertigungstechnischer Eigenschaften zu finden, ist die Topologieoptimierung. Das primäre Ziel ist die Minimierung der Bauteilmasse.

Es ist wünschenswert, bereits in dieser frühen Designphase die Akustik zu berücksichtigen, um Kosten durch spätere Konzeptänderungen an Prototypen zu verringern. Bisher in der Praxis angewandte akustische Optimierungsansätze erfassen in der Regel nur einige wenige Einflussfaktoren wie z.B. die Eigenfrequenz des Bauteils. Die komplexen akustischen Wechselwirkungen bei der Körperschallleitung sowie der Abstrahlung werden derzeit im Produktentwicklungsprozess nicht ausreichend berücksichtigt.

Dieser Beitrag zeigt grundlegende Ansätze und Kriterien, die für die Topologieoptimierung genutzt werden können, um den Einfluss einer lokalen Gestaltänderung auf das globale akustische Verhalten des Bauteils zu bewerten. Auf dieser Basis können Regeln abgeleitet werden, wonach der Strukturoptimierungsalgorithmus Elemente im Bauraum entfernt oder hinzufügt.

Topologieoptimierungsstrategie

Die Topologieoptimierung ist eines der am häufigsten verwendeten rechnerunterstützen Werkzeuge zur Ermittlung der Grundgestalt einer Struktur. Durch Änderung der Lage und Anordnung von Strukturelementen wird anhand definierter Designregeln und Restriktionen eine möglichst optimale Struktur gefunden. Hierbei handelt es sich fast immer um lokale Optima. Die am Institut verfolgte diskrete Optimierungsstrategie beruht auf der bidirektionalen evolutionären Strukturoptimierung und der Soft-Kill-Option von Mattheck (1992). Auf Grundlage eines FE-Hexaedermodells (Voxelmodell) werden kaum belastete Elemente entfernt, während an hochbelasteten Bereichen Material in Form neuer Voxel angelagert wird.[1] Der Konstruktionsprozess besitzt bisher folgende Randbedingungen:

Zielfunktion:

- Gewichtsminimierung

Designregeln:

- Anlagerung an Elementen mit hoher Spannung
- Wegnahme von Elementen mit geringer Spannung

Restriktionen:

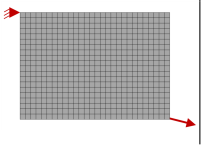
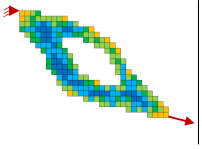
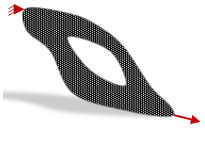
- Festigkeit des Materials
- Fertigungsbeschränkungen

Ergebnis:

- Designvorschlag → Umsetzung in Konstruktion

Es ergeben sich drei wesentlich Schritte bis zur endgültigen Konstruktion. Zuerst findet die *Definition* des Bauraumes und der Randbedingungen statt, gefolgt von der eigentlichen Optimierung, d.h. die *Modifikation*, der Struktur anhand der Designregeln und Restriktionen. Am Ende erhält der Ingenieur einen Designvorschlag zur *Interpretation*. Dieser muss in ein CAD-Modell überführt werden. In der Tabelle 1 ist der Ablauf übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 1: Konstruktionsprozess mittels Topologieoptimierung

Definition	Modifikation	Interpretation
- Entwurfsvariablen definieren - Definition der Randbedingungen und Lasten	- Designregeln folgen - Restriktionen berücksichtigen	- Ingenieurmäßige Interpretation des Designvorschlages
		

Für die Berücksichtigung der Akustik besteht die Herausforderung darin, dem Optimierungsalgorithmus Regeln vorzugeben, mit denen er entscheiden kann an welchen Stellen der Struktur es nicht nur aus mechanischer sondern auch aus akustischer Sicht sinnvoll ist, Material anzulagern oder zu entfernen. Das Primärziel, eine optimale Materialverteilung im festgelegten Bauraum und somit ein möglichst leichtes Bauteil zu generieren, bleibt bestehen. Darüber hinaus ist es bei dem hier verfolgten Optimierungsansatz notwendig, akustische Restriktionen

in Form definierter Grenzwerte vorzugeben. Die Sensitivitäten bestimmter Bereiche der Struktur lassen sich nicht direkt berücksichtigen.

Ziele einer akustischen Optimierung

Das primäre Ziel einer akustischen Optimierung ist die Reduktion der abgestrahlten Luftschallleistung P. Zur Identifikation der zu beeinflussenden Parameter am Bauteil kann sich im ersten Schritt dem Modell der *maschinenakustischen Grundgleichung* (1) zur Beschreibung der indirekten Kette der Schallabstrahlung bedient werden. Hierin beschreibt $\varrho_L c_L$ die Impedanz des umgebenden Fluids (Luft). Zudem hat neben der Oberfläche S des Bauteils die punktförmig anregende Einzelkraft $\tilde{F}$ einen entscheidenden Einfluss auf die Schallabstrahlung. Weitere Einflussgrößen sind der Abstrahlgrad σ und die mittlere quadratische Übertragungsadmittanz $h^2_{\tilde{U}}$. Die genannten akustischen Größen sind jeweils abhängig von der Frequenz f.[3]

$$P(f) = \varrho_L c_L \sigma(f) S h^2_{\tilde{U}}(f) \tilde{F}^2(f) \qquad [\mathrm{W}] \qquad (1)$$

Anhand der Gleichung (1) können drei Bereiche identifiziert werden, welche die Schallabstrahlung grundlegend beeinflussen. Dies sind die *Anregung* durch den Arbeitsprozess, die *Körperschallübertragung*, d.h. die mechanischen Schwingungen, die als Körperschallenergie über die Bauteilstruktur bis zur Bauteiloberfläche weitergeleitet werden, und schließlich die *Luftschallabstrahlung*, welche durch die vibrierende Oberfläche die angrenzenden Luftteilchen zu Schwingungen anregt. Die Körperschallenergie wird letztendlich in Hörschall umgesetzt. Der indirekte Pfad der Luftschallabstrahlung wird durch die Abbildung 1 veranschaulicht.

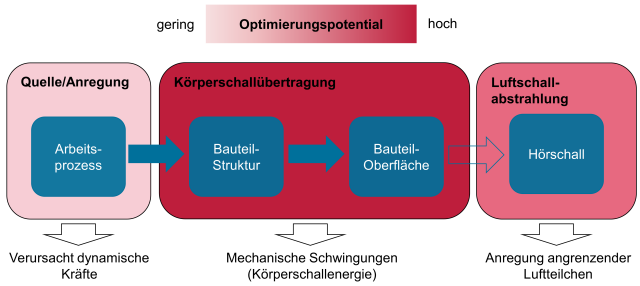


Abbildung 1: Blockschaltbild der maschinenakustischen Grundgleichung und eingeschätztes Potential bei der Topologieoptimierung

Für eine akustische Optimierung gilt es demnach die

- **Schallenergieeinleitung zu reduzieren:** Die Energieeinleitung kann reduziert werden, indem der Anregung hohe Eingangimpedanzen (viel Masse) entgegengesetzt werden. Darüber hinaus hat die Position der Energieeinleitung einen wesentlichen Einfluss auf die resultierende Schallabstrahlung.[4]
- **Schallübertragung zu reduzieren:** Der Schallenergiepfad muss möglichst optimal gestaltet werden. Wirksame Maßnahmen sind die Anzahl an Impedanzsprüngen zu erhöhen (Dämmung erhöhen) und den Körperschallpfad entlang dämpfender Bereiche zu führen (Dämpfung erhöhen). Außerdem sollte das Eigenschwingverhalten auf die Anregung abgestimmt werden.[4]
- **Schallabstrahlung zu reduzieren:** Bei der Oberflächengeometrie des Bauteiles sollten sich kompakte Fläche und geringe Wandstärken wiederfinden. Ferner sollte der akustische Kurzschluss ausgenutzt werden, um die Schallabstrahlung zu reduzieren.[4]

In der Abbildung (1) ist farbig kenntlich gemacht, wie das Optimierungspotential der einzelnen Bereiche in der Topologieoptimierung eingeschätzt wird. Hierbei bezieht sich die Größe des Potentials nicht auf die Größe der möglichen Reduktion durch eine Beeinflussung in diesem Bereich, vielmehr soll damit die Machbarkeit einer automatisierten Algorithmussteuerung eingeschätzt werden. Es gilt auch hier der Grundsatz: je näher die Schallenergie an der Quelle dissipiert werden kann, desto größer ist ein positiver Effekt in der Schallabstrahlung zu erwarten.

In Hinblick auf eine industrielle Anwendung sind Arbeitsprozesse und Krafteinleitungspunkte zumeist vorgeschrieben, was wenig Spielraum bei der Modifikation der Energieeinleitung zulässt und somit das geringste Potential verspricht.

Das Potential bei der Schallabstrahlung wird indes stärker eingeschätzt. Hier bleibt der Freiraum bei der Oberflächengestaltung des Bauteils. Grund für das reduzierte Optimierungspotential sind die aufwändigen Nachlaufrechnungen, die keine vertretbare Berechnungszeit nach sich ziehen könnten. Das globale Verhalten der Struktur ist hier entscheidend.

Das größte Potential bei einer akustischen Topologieoptimierung wird in der Beeinflussung der Körperschallübertragung gesehen. Hier können lokale Bereiche für sich betrachtet werden. Zudem können lokale Größen herangezogen werden, um die Schallübertragung zu bewerten und in einem folgenden Schritt zu modifizieren. Es entspricht der grundsätzlichen Wirkungsweise der Topologieoptimierung.

Herausforderung einer akustischen Topologieoptimierung

Das Grundproblem bei der Definition akustischer Anforderungen in der Topologieoptimierung ist der Konflikt zwischen der Gewichtsminimierung und einer verbesserten Akustik. Eine parallel, neben der Minimierung der Bauteilmasse, definierte Zielfunktion, welche die abgestrahlte Schallleistung minimieren soll, würde zu konträr wirksamen Maßnahmen führen.

Die Aufgabe besteht also darin, den Algorithmus so zu steuern, dass er auf dem Weg zu den verschiedenen lokalen Minima (welche auch globale sein könnten) möglichst den Weg nimmt, der zum akustisch Besten führt. Dazu ist es notwendig, die Wirkung der einzelnen Voxel auf das akustische Verhalten in jedem Iterationsschritt zu bewerten. Voraussetzung hierfür ist, dass eine quantitati-

ve lokale Größe zur Verfügung steht, die eine Bewertung ermöglicht. Gleichzeitig kommt hier das Problem zum Tragen, dass nur wenige quantitative Größen verfügbar sind.

Die numerischen Berechnungen des FE-Hexaedermodells liefern ausschließlich Verschiebungen an den Knotenpunkten. Hieraus lassen sich die Schnellen über Modellannahmen und mechanische Spannungen über Materialgesetze berechnen. Zudem sind die geometrischen Größen der Struktur sowie Material- und Fluidparameter bekannt. Diese physikalischen Größen bilden die Informationsbasis aus der eine lokale Bewertung abgeleitet werden muss. Zusätzliche Informationen, die zur Bewertung der Schalleinleitung und -abstrahlung nötig wären, können nur über aufwändigere Nachlaufrechnungen, wie z.B. eine Modalanalyse, ermittelt werden. Dies ist ein weiteres Argument den Fokus stärker auf den Körperschallübertragungspfad zu legen, auf welchen sich in den folgenden Ansätzen zur lokalen Bewertung konzentriert wird.

Ein weiteres Problem entsteht wenn akustische Restriktionen vorgegeben werden sollen. Materialgrenzwerte hinsichtlich ertragbarer mechanischer Spannungen sind weitreichend verfügbar. Gleiches gilt für die Fertigungsrestriktionen. Literatur- und Erfahrungswerte was bspw. günstige und ungünstige Aushebeschrägen beim Gießen eines topologisch optimierten Bauteils angeht sind hinreichend bekannt. Eine quantitative akustische Größe vorzugeben, welche nicht überschritten werden soll, ist ganz und gar nicht trivial. Diese sind stark von der anfangs unbekannten Endgeometrie abhängig und somit nicht quantifizierbar.

Ansätze zur lokalen Bewertung

Aktuell wird ein Ansatz getestet, der als Ergebnis ein topologieoptimiertes akustisch verbessertes Bauteil unter Einhaltung mechanischer und fertigungstechnischer Randbedingungen generieren soll. Dabei wird in jedem Iterationsschritt zeitgleich mit der derzeitigen mechanischen und fertigungstechnischen Bewertung der Voxel eine akustische Bewertung vorgenommen. Hierfür soll die Strukturintensität $\vec{I}_S$ (STI) eingesetzt werden. Sie ist als Produkt aus Spannungstensor $\underline{\boldsymbol{S}}$ und Geschwindigkeitsvektor $\underline{\vec{v}}^*$ definiert.[2]

$$\underline{\vec{I}}_S(f) = -\frac{1}{2}\underline{\boldsymbol{S}}(f) \cdot \underline{\vec{v}}^*(f) \qquad \left[\mathrm{W/m^2}\right] \qquad (2)$$

Die Unterstriche kennzeichnen komplexe Größen. Mit dem Asterisk wird eine komplex konjugierte Größe gekennzeichnet.

Die STI ist eine vektorielle Größe und durch ihre *Flussrichtung* und *Flussdichte* gekennzeichnet. Diese beiden Größen sollen genutzt werden, um als Indikator für Applikationen von Strukturänderungen zu dienen. Die Grundannahme, die dahinter steckt, ist, dass Bereiche mit großem STI die Körperschallleitung und damit die Schallabstrahlung begünstigen.

Vorteil dieses Ansatzes ist es, dass die physikalischen Größen zur Berechnung lokal verfügbar sind und sich die STI einfach ermitteln lässt. Zudem resultiert neben einer lokalen quantitativen Energiegröße auch eine lokale Richtungsinformation.

Derzeit laufen zu diesem Thema intensive Forschungen, um anhand der Richtung, der Größe und der Verteilung des STI gezielte Strukturveränderungen vornehmen zu können. Durch Platzierung von diskreten Federn und Massen konnte bereits gezeigt werden, dass das Körperschallverhalten durch wenige Modifikationen verbessert werden kann.[5]

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag fasst grundsätzliche Ziele einer akustischen Optimierung kurz zusammen. Zudem zeigt er welche Probleme bei der Topologieoptimierung unter akustischen Anforderungen bestehen. Die Kernidee ist eine spannungsbasierte Topologieoptimierung, mit dem Ziel Gewicht zu minimieren und gleichzeitig die abgestrahlte Schallleistung zu reduzieren, mit Hilfe der STI zu realisieren. Im Speziellen wurde hier auf die Optimierung des Übertragungsweges eingegangen. Die STI fungiert als lokaler Indikator für gezielte Strukturmodifikationen in jedem Iterationsschritt.

In weiterführenden Untersuchungen sollen intensive Sensitivitätsanalysen zur gezielten Leitung des Körperschallenergieflusses anhand struktureller Änderungen durchgeführt werden. Ein entscheidendes Forschungsziel ist es, die Frage zu klären, welchen Einfluss die lokalen Änderungen auf das globale akustische Verhalten haben und wie diese Zusammenhänge gezielt ausgenutzt werden können. Weiterhin sollte erforscht werden, welches Potential dieser Ansatz in Kombination mit anderen Optimierungsstrategien besitzt. Hierbei könnten vor allem sensitivitätsbasierende Strategien mit dem klassischen SIMP-Ansatz neue Möglichkeiten erschließen.

Literatur

[1] Fiebig, S.; Axmann, J. K.: Using a binary material model for stress constraints and nonlinearities up to crash in topology optimization. WCSMO 10 (2013)

[2] Hanselka, H.; Bös, J.: Maschinenakustik. In Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau (Grote, K.-H.; Feldhusen, J., Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, 2011

[3] Kollmann, F. G.; Schösser, T. F.; Angert, R.: Praktische Maschinenakustik. Springer-Verlag, Berlin, 2006

[4] N.N.: Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer Maschinen und Geräte - Teil 1: Planung. DIN EN ISO 11688-1, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 1998

[5] Schaal, C.; Ebert, J.; Bös, J.; Melz, T.: Analyse der Strukturintensität in akustisch verbesserten Strukturen. DAGA (2015)