

Kombinierte Bewertung von Luft- und Körperschallverhalten von Leichtbau-Karosseriebauweisen

Meike Kollmanthaler¹, Felix Sperber¹, Daniel Jansen¹, Sabine C. Langer²

¹ Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 70435 Stuttgart, E-Mail: meike.kollmanthaler@porsche.de

² Institut für Akustik, 38106 Braunschweig

Bei der Entwicklung von Premiumsportwagen spielt Leichtbau aufgrund hoher Anforderungen sowohl bezüglich Fahrdynamik als auch Effizienz eine große Rolle. Darüber hinaus müssen insbesondere die Sportlimousinen hohen Komfortansprüchen der Kunden gerecht werden. Die Anforderungen an den akustischen Komfort sind oftmals gegenläufig zu den Leichtbaubestrebungen, da masseintensivere Bauweisen tendenziell die akustischen Eigenschaften, wie beispielsweise das Schalldämm-Maß, verbessern. Zur systematischen Auswahl des bestgeeigneten Leichtbau-Gesamtkonzepts zur Erfüllung definierter akustischer Zielgrößen wird im vorliegenden Beitrag eine gesamtheitliche Bewertungsmöglichkeit vorgeschlagen. Bei der Bewertung werden fahrzeugspezifische Anforderungen und Randbedingungen wie beispielsweise Kosten, Bauraum, Masse sowie die Priorisierung von Masse oder akustischen Eigenschaften berücksichtigt.

Für eine gesamtheitliche Bewertung im frühen Entwicklungsstadium sind mehrere Bewertungsgrößen relevant. An den meisten Karosserieflächen herrscht eine kombinierte Luft- und Körperschallanregung vor, sodass die Bauteileigenschaften sowohl hinsichtlich Luftschall als auch hinsichtlich Körperschall bewertet werden sollten. Die physikalischen Phänomene und Zusammenhänge kombinierter Luft- und Körperschallanregung von Karosseriebauteilen sind sehr komplex.

Im vorliegenden Beitrag wird zur Lösung des beschriebenen Zielkonfliktes ein Kennwertsystem für eine gesamtheitliche Bewertungsmöglichkeit von Leichtbau und Akustik vorgeschlagen, welches die Zusammenhänge im Folgenden stark vereinfacht und damit handhabbar macht.

Kennwertsystem

Aus der bereits beschriebenen Motivation für eine gesamtheitliche Bewertungsmöglichkeit leiten sich bereits einige Anforderungen an das Kennwertsystem ab. In erster Linie sollen Leichtbau- und Akustik-Komfort-Anforderungen kombiniert bewertet werden können. Ziel ist die Bewertung im frühen Entwicklungsstadium, um die Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse in den nachfolgenden Entwicklungsprozessen zu ermöglichen. Bedingt durch den zeitlichen Versatz zwischen der Entwicklung von Rohbau und Interieur ist es schwierig, die akustische Wirksamkeit der Kombination aus Rohbauteil und Interieurbauteil zu beurteilen. Darüber hinaus können Messungen am Gesamtfahrzeug im Rahmen von Akustik-Erprobungen erst in einem sehr späten Entwicklungsstadium stattfinden. Zu diesem Zeitpunkt sind Anpassungen der Serienwerkzeuge meist aufwändig und sehr kostenintensiv.

Aufgrund der diversen Anwenderzielgruppe aus Rohbaukonstruktoren/innen, Interieurkonstruktoren/innen,

Projektleitern/innen, Akustikern/innen, Controllern/innen etc. ist eine einfache Verständlichkeit des Bewertungsergebnisses erwünscht. Um sowohl hohe Flexibilität und Anwendungsraten als auch eine hohe Aussagekraft und großen Informationsmehrwert zu gewährleisten, wird zum einen eine modulare Erweiterbarkeit des Kennwerts und zum anderen eine Möglichkeit zur Adaption auf spezifische Anwendungsfälle angestrebt.

Zur gesamtheitlichen Bewertung der Substitution eines Referenz-Rohbaumaterials durch ein potentielles Rohbaumaterial wird ein Kennwert Γ nach folgendem Schema entwickelt (Gleichung (1)).

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n t_i k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} - 0,5 \quad (1)$$

Die Variable n beschreibt die Gesamtanzahl der verwendeten Bewertungsgrößen. Durch die Division mit der Summe der Gewichtungsfaktoren nimmt der Bruch in Gleichung (1) Werte zwischen 0 und 1 an. Um für eine Verschlechterung des Probenmaterials gegenüber dem Referenzmaterial einen negativen und für eine Verbesserung einen positiven Kennwert Γ zu erzielen, wird in Gleichung (1) 0,5 subtrahiert. So wird der Wertebereich von $[0;1]$ auf $[-0,5; +0,5]$ verschoben.

In Gleichung (2) und (3) werden sogenannte Referenzenquotienten $t_{i,a/b}$ eingeführt. Mittels der Referenzenquotienten wird jeweils eine Bewertungsgröße β_i der Probe auf die der Referenz bezogen. Bewertungsgrößen β_i können z.B. Flächengewicht, Biegesteifigkeit oder abgestrahlter Schalleistungspegel sein. Für Bewertungsgrößen, z. B. abgestrahlte Schalleistung, bei denen ein hoher Wert negativ bewertet wird, wird der Referenzenquotient nach Gleichung (2) gebildet. Für Bewertungsgrößen, z. B. Schalldämm-Maß, bei denen ein hoher Wert positiv ist, wird der Referenzenquotient hingegen nach Gleichung (3). Die Indizes *Ref* und *Pro* stehen für das Referenzmaterial bzw. das jeweilige Probenmaterial. Bei den Proben kann es sich sowohl um Ersatzgeometrien als auch um Bauteile oder sogar Baugruppen handeln.

$$t_{i,a} = \frac{\beta_{Ref}}{\beta_{Ref} + \beta_{Pro}} \quad (2)$$

$$t_{i,b} = \frac{\beta_{Pro}}{\beta_{Ref} + \beta_{Pro}} \quad (3)$$

Die Gewichtungsfaktoren k_i ermöglichen die Adaption der Bewertung auf spezifische Anwendungsfälle, indem den einzelnen Bewertungsgrößen, je nach gesamtheitlichem Auslegungsziel, unterschiedliche Relevanz zugestanden wird.

Gesamtheitlicher Leichtbau-Akustik-Kennwert

Für den gesamtheitlichen Leichtbau-Akustik-Kennwert Γ werden in diesem Beitrag beispielhaft die Bewertungsgrößen Flächenmasse m'' , Biegesteifigkeit B , Wanddicke h , abgestrahlter Schallleistungspegel L_P und das gemittelte Schalldämm-Maß R_j verwendet. Prinzipiell kann dieser Kennwert je nach Einsatzzweck um weitere akustische oder werkstoffmechanische Größen erweitert werden. Der gesamtheitlichen Leichtbau-Akustik-Kennwert Γ ergibt sich nach Gleichung (4) und basiert auf dem Schema nach Gleichung (1).

$$\Gamma = \left(k_1 \frac{m''_{Ref}}{m''_{Ref} + m''_{Pro}} + k_2 \frac{B_{Pro}}{B_{Ref} + B_{Pro}} + k_3 \frac{h_{Ref}}{h_{Ref} + h_{Pro}} + k_4 \frac{L_{P,Ref}}{L_{P,Ref} + L_{P,Pro}} + \sum_{j=1}^m k_{j+4} \frac{R_{j,Pro}}{R_{j,Ref} + R_{j,Pro}} \right) \frac{1}{\sum_{i=1}^m k_i} - 0,5 \quad (4)$$

Das gemittelte Schalldämm-Maß kann zur spezifischen Gewichtung in mehrere Frequenzbereiche aufgeteilt werden. In diesem Fall werden jeweils die untere Grenze f_u und die obere Grenze f_o des Frequenzbereichs mit dem Index j festgelegt. Die Messwerte des Schalldämm-Maßes jeder Terzmittenfrequenz des Frequenzbereichs R_f werden anschließend nach Gleichung (5) energetisch gemittelt [1].

$$R_j = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{M} \sum_{f=f_u}^{f=f_o} 10^{R_f/10} \text{ dB} \right] \quad (5)$$

Probenauswahl und Ermittlung der Bewertungsgrößen

Im vorliegenden Beitrag wird der Leichtbau-Akustik-Kennwert lediglich auf Rohbauproben angewendet. Eine Bewertung inklusive Interieurbauteilen steht momentan noch aus. Die Verwendung von Werkstoffen im Fahrzeugrohbau ist unter anderem an Randbedingungen aus dem Produktionsprozess gekoppelt. Eine Randbedingung, die beispielsweise bei der Auswahl von Grundwerkstoffen berücksichtigt werden muss, ist die Tauglichkeit eines Werkstoffs für eine kathodische Tauchlackierung sowie die anschließende Trocknung bei ca. 180°C [2]. Der Probenumfang beinhaltet die Grundwerkstoffe Stahl (St), Aluminium (Al) und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff mit einer Epoxidharzmatrix (CF-EP). Die Proben sind so bezeichnet, dass die erste Angabe dem Grundwerkstoff entspricht und die darauffolgende Zahl die Nennwanddicke in Millimetern angibt. Proben, die eine Zwischenschicht aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) besitzen, sind mit einem Stern gekennzeichnet. Die Eigenschaften der Proben finden sich in Tabelle 1. Der Elastizitätsmodul (E-Modul) der Werkstoffe wurde mittels Dreipunktbiegeversuch an 400 mm x 50 mm großen Proben und unter Verwendung einer 10 kN-Kraftmessdose ermittelt.

In der Karosserie kann Stahlblech in einer Wanddicke von 0,75 mm je nach Beanspruchungsart durch Aluminiumblech in verschiedenen Wanddicken substituiert werden. Bei Auslegung auf ähnliche Biegesteifigkeit und Beulstabilität lässt sich St0,75 durch Aluminium der Wanddicke von ca.

1,0 mm (Al1,0) ersetzen, was einer Massehalbierung entspricht. Für gleiche Zug-/Drucksteifigkeit wird St0,75 durch Aluminiumblech ähnlicher Masse ersetzt, woraus sich eine Wanddicke von 2,0 mm (Al2,0) ergibt. In der industriellen Praxis werden mit Sicken versehene Stahlbleche häufig mit einer etwa dreißigprozentigen Masseersparnis durch Aluminiumbleche ersetzt. Die gemittelten mechanischen Eigenschaften hinsichtlich mehrerer überlagerter Lastfälle beider Blechbauteile sind ähnlich, wenn die Wanddicke des Aluminiumbleches etwa doppelt so hoch ist wie die Wanddicke des Stahlbleches. In Anlehnung an die industrielle Praxis wird zusätzlich ein Aluminiumblech mit einer Wanddicke von 1,5 mm (Al1,5) ausgewählt. [3–5]

Tabelle 1: Auswahl untersuchter Proben

Probenbezeichnung	Tatsächliche Wandstärke h [mm]	Flächenmasse m'' [kg/m ²]	E-Modul [N/mm ²]
St0,75	0,75	5,86	204.348
Al1,0	0,98	2,66	75.144
Al1,5	1,50	3,90	75.144
Al2,0	2,02	5,39	75.144
CF-EP	2,17	3,01	46.209
CF-EP*	2,02	2,80	40.608
St1,0*	1,04	7,82	109.100

* Probe enthält eine Zwischenschicht aus EPDM

Sowohl die Körperschalluntersuchungen, als auch die Luftschalluntersuchungen werden an ebenen, unverprägten Plattenproben der Größe 478 mm x 384 mm durchgeführt, wobei die schwingende Fläche jeweils 400 mm x 300 mm beträgt. Für die Körperschallversuche werden die Plattenproben in einen massiven Stahlrahmen fest eingespannt und mit einem Shaker angeregt. Mittels Laserscanningvibrometrie wird die Oberflächenschnelle ermittelt und mit Hilfe der Elementarstrahlertheorie ein Maß für den abgestrahlten Schallleistungspegel errechnet. Dabei ist zu beachten, dass dieser Wert nicht den tatsächlich abgestrahlten Schall repräsentiert, sondern lediglich für einen relativen Vergleich im Rahmen der Kennzahlbewertung herangezogen wird. Die Plattenproben werden zudem in einem Bauakustischen Prüfstand in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 10140-2:2016 hinsichtlich ihres Schalldämm-Maßes R untersucht. Der Gültigkeitsbereich dieser experimentellen Luftschalluntersuchungen ist an der unteren Grenze auf 250 Hz und der oberen Grenze auf 5.000 Hz begrenzt. Für eine differenziertere Bewertung wird der Gültigkeitsbereich unter Verwendung von [6] in drei Frequenzbereiche eingeteilt, die in Tabelle 2 aufgelistet sind.

Tabelle 2: Frequenzbereiche und ihre Hauptgeräuschquellen im Fahrzeug [6]

Frequenzbereich in Hz	Hauptgeräusche bei 50 km/h	Hauptgeräusche bei 160 km/h
250-630	Motorgeräusch	Windgeräusch
630-2.000	Motorgeräusch, Reifen-Fahrbahngeräusch	Windgeräusch, Reifen-Fahrbahn-Geräusch
2.000-5.000		Windgeräusch

Anwendungsbeispiel: Stirnwand

Nachfolgend wird der gesamtheitliche Leichtbau-Akustik-Kennwert als unterstützende Kennzahl bei der Materialauswahl exemplarisch an einer Stirnwand in einer Sportlimousine mit Frontmotor angewendet (vgl. Abbildung 1). In Tabelle 3 sind die verwendeten Gewichtungsfaktoren und in Abbildung 2 die resultierenden Werte für Γ aufgetragen. Es werden ebenfalls die Frequenzbereiche aus Tabelle 2 genutzt.



Abbildung 1: Stirnwand im Rohbau eines Porsche Panamera

Je nach Projektlage kann die Gewichtung von Masse und Bauraum unterschiedlich ausfallen. In Tabelle 3 wird zunächst eine Gewichtung mit dem Fokus Massereduktion dargestellt. Solch eine Gewichtung wäre denkbar, wenn das Zielgewicht des Konzeptes überschritten wird. Die zweite Gewichtungsvariante mit einer höheren Gewichtung des Bauraumbedarfs wäre denkbar, wenn zum Beispiel die angestrebte Radstandsänge des Fahrzeugkonzeptes im vorliegenden Entwicklungsstand noch überschritten wird. Die Gewichtung der akustischen Bewertungsgrößen ist in beiden Varianten identisch. Ebenfalls identisch ist die geringe Gewichtung der Biegesteifigkeit, da, abgesehen von einer bestimmten Mindeststeifigkeit für Herstellung und Handling, keine Steifigkeitsanforderungen an eine Stirnwand gestellt werden.

Tabelle 3: Gewichtungsfaktoren k_i

Gewichtungsfaktoren k_i	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
Bewertungsgröße β_i	m''	B'	h	L_P	R_1	R_2	R_3
Stirnwand (\rightarrow Masse)	6	1	2	1	3	3	2
Stirnwand (\rightarrow Bauraum)	2	1	6	1	3	3	2

Gemäß der zuvor erläuterten Frequenzbereiche ist der Verbrennungsmotor im Bereich von 250 Hz bis 2.000 Hz eine maßgeblich zum Gesamtpegel beitragende Geräuschquelle, weshalb die Faktoren der entsprechenden Frequenzbereiche mit höheren Werten als die des Frequenzbereichs von 2.000 Hz bis 5.000 Hz belegt werden.

In Abbildung 2 sind die Werte des Leichtbau-Akustik-Kennwerts für beide Gewichtungsvarianten dargestellt. Es wird deutlich, dass in der massepriorisierenden Gewichtung die Varianten aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) und Aluminium der Wanddicke 1,5 mm einen positiven Wert liefern. Diese Varianten stellen auch in der Praxis potentielle Leichtbaumaßnahmen bei flächigen Karosseriebauteilen dar. Während die Substitution eines Stahlblechs der Wanddicke 0,75 mm durch ein Aluminiumblech der Wanddicke 1,5 mm häufig in Großserien eingesetzt wird, kommt die Substitution durch CFK unter anderem aufgrund der hohen Kosten eher in Klein- oder Kleinstserien vor. Ist hingegen die Minimierung des

Bauraums gegenüber der Masse priorisiert, liefert die Stahlplatte St0,75 (Referenz) den besten Kennwert. Dieses Ergebnis liegt in der geringen Wandstärke bei vergleichsweise guten akustischen Eigenschaften begründet.

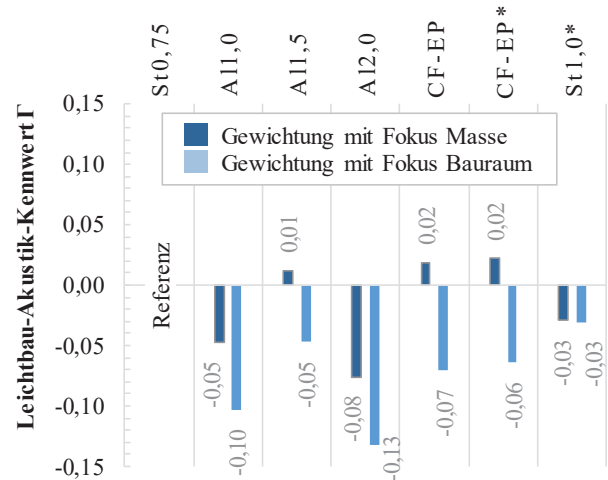


Abbildung 2: Leichtbau-Akustik-Kennwert der Prüfplatten für zwei unterschiedliche Gewichtungsvarianten

Zukünftig soll die Kennzahl um weitere relevante Bewertungsgrößen, z. B. Materialkosten, und auf Gesamtsysteme inkl. Interieurbauteile erweitert werden. Zudem sollte eine Richtlinie zur Festlegung von Gewichtungsfaktoren und der damit zusammenhängenden Interpretation der Kennzahl-ergebnisse erarbeitet werden. Darüber hinaus sollte anhand von Gesamtfahrzeugversuchen die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Modell auf reale Bauteile untersucht werden. Die Kennzahl ist zum Beispiel vergleichsweise gut geeignet, um geometrisch ähnliche Varianten eines Karosseriebauteils miteinander zu vergleichen, da diese sich im Wesentlichen bezüglich des Werkstoffs und der Wanddicke unterscheiden. Werden hingegen zwei Varianten mit stark abweichender Geometrie verglichen, ist die Kennzahl nur sehr eingeschränkt aussagekräftig.

Literatur

- [1] Maue, J.; Hoffmann, H.; Lüpke, A. 0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel. Berlin, Erich Schmidt 2009
- [2] Pischinger, S.; Seiffert, U. Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden, Springer Vieweg 2016
- [3] Ashby, M. Materials Selection in Mechanical Design. Amsterdam, Butterworth-Heinemann 2005
- [4] Kellner, P. Zur systematischen Bewertung integrativer Leichtbau-Strukturkonzepte für biegebelastete Crashträger. Göttingen, Cuvillier Verlag 2014
- [5] Leichtbau im Automobil – ein Überblick, URL: <https://www.heise.de/autos/artikel/Leichtbau-im-Automobil-ein-Ueberblick-1241765.html>
- [6] Riegel, M. Bestimmung der Anteile von Antriebs-, Umströmungs- und Rollgeräuschen im Innenraum von PKW. Renningen, Expert 2011