

Analyse von Clipverbindungen zur Befestigung von Fahrzeugverkleidungen

Kai Bahrke-Rein¹, Peter Groba-Güsken², Christian Adams¹, Tobias Melz^{1,3}

¹ Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau,
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM,
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt
E-Mail: kai.bahrke@sam.tu-darmstadt.de

² BMW Group, Strukturtechnik, 80788 München

³ Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF,
Bartningstraße 47, 64289 Darmstadt

Einleitung

Durch das steigende Komfortbedürfnis der Insassen steigen gleichermaßen die Anforderung an die Innenraumakustik der Fahrzeuge. Ein Teil der Fahrzeugakustik beschäftigt sich mit dem Körperschall und Luftschall, der durch Anregung der Karosserie über die Innenverkleidung in den Fahrzeuginnenraum übertragen wird. Die Innenverkleidung von Tür, Dach, Heckklappe usw. wird unter anderem mittels Kunststoffclips an der Karosseriestruktur befestigt. Über diese Kontaktpunkte werden von der Karosserie Schwingungen auf die Innenverkleidung übertragen. Es existiert eine Vielzahl an Clips, die sich in Größe, Gewicht, Material, Komplexität im Aufbau etc. unterscheiden. Die Clips aktueller Fahrzeugmodelle bestehen aus einem Kunststoff (Thermoplast) und sind mit einem Dichtungselement (Elastomer) ausgestattet. In diesem Beitrag wird eine Clipsorte mit Dichtung hinsichtlich ihrer Schwingungsminderung untersucht. Ermittelt wird hierbei das Übertragungsverhalten des Körperschalls durch den Clip in Form der Durchgangsdämpfung sowie die Körperschallreduktion durch den Einfluss des Dichtungselements in Form der Einfügungsdämpfung. Dazu wird ein Clip im Testaufbau angebracht und verschiedene Untersuchungen für den relevanten Frequenzbereich von 10 Hz bis 1 kHz durchgeführt. Abolfathi [1] zeigt in seinen Untersuchungen, dass Clipverbindungen aufgrund von Montageeinflüssen einen erheblichen Einfluss auf die Transferfunktionen haben. Daher wird auch die Unsicherheit durch den Montageeinfluss untersucht. Des Weiteren wird eine alternative Clipverbindung in Form eines Elastomer-Metallelements getestet. Die gesamte Untersuchung erfolgt experimentell und wird mit numerischen Simulationen unterstützt.

Grundlagen

Das Einfügungsdämpfungsmaß D_E [vgl. 2, 3] wird durch das Verhältnis der Schwinggeschwindigkeit hinter einer schwingungsmindernden Maßnahme ($v_{\text{Maßnahme}}$) zur Schwinggeschwindigkeit ohne Maßnahme ($v_{\text{ohneMaßnahme}}$) nach Gleichung (1)

$$D_E = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{v_{\text{Maßnahme}}}{v_{\text{ohneMaßnahme}}} \right)^2 \text{ dB} \quad (1)$$

bestimmt. Dadurch kann beispielsweise eine starr aufgestellte Maschine mit einer elastisch entkoppelten Aufstellung verglichen werden.

Das Durchgangsdämpfungsmaß D_D [vgl. 4] ergibt sich aus dem Verhältnis der Schwinggeschwindigkeiten vor (v_{vor}) und hinter (v_{hinter}) einem Bauteil nach Gleichung (2)

$$D_D = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{v_{\text{hinter}}}{v_{\text{vor}}} \right)^2 \text{ dB} \quad (2)$$

Es beschreibt die Veränderung der Schwinggeschwindigkeit durch ein Bauteil z. B. ein schwingungsdämpfende/-dämmendes Abkoppelement.

Die Transfer-Admittanz H wird nach Gleichung (3)

$$H = \frac{v_{\text{vib}}}{F_E} \text{ ms}^{-1}\text{N}^{-1} \quad (3)$$

berechnet, wobei v_{vib} für die Schwinggeschwindigkeit gemessen durch das Vibrometer und F_E für die Eingangskraft des Shakers steht. Da auf dem Clip nur ein Messpunkt festgelegt ist, entspricht $v_{\text{vib}} = v_{\text{clip}}$. Bei der Messung auf der Oberfläche der Teststruktur und auf der Masse werden mehrere Messpunkte gescannt, weshalb v_{vib} für diese Fälle eine oberflächengemittelte Größe ist. Der Pegel der Transfer-Admittanz L_H wird nach Gleichung (4)

$$L_H = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 \text{ dB} \quad (4)$$

bestimmt.

Prüfstand

Der Prüfaufbau besteht aus einem Vierkantprofil aus Aluminium mit 50 mm Kantenlänge und einer Bohrung von 8,5 mm Durchmesser auf der Oberseite (Teststruktur). Auf der Rückseite der Teststruktur ist ein Impedanzmesskopf montiert, der die Eingangskraft F_E sowie die Eingangsbeschleunigung a_E aufnimmt. Die Teststruktur wird mit einem Shaker, der über eine Gewindestange mit dem Impedanzmesskopf verbunden ist, angeregt. Abbildung 1 zeigt die Skizze des Aufbaus, bei dem Shaker und Teststruktur über dünne Schnüre am Rahmen aufgehängt sind, um frei-frei Randbedingungen darzustellen.

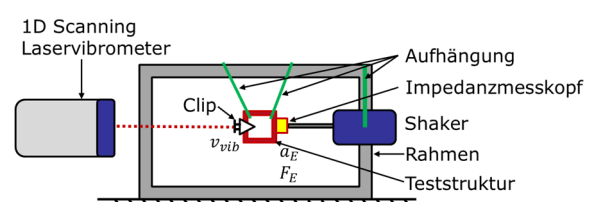


Abbildung 1: Skizze des Prüfstands aufbaus.

Die Schwinggeschwindigkeit v_{vib} an der Oberseite der Teststruktur und an der Oberseite des Clips werden mit einem 1D Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer erfasst. Die Anregung erfolgt mit einem Periodic Chirp in einem größeren Frequenzbereich von 10 Hz bis 4 kHz, um auch die Resonanzen der Teststruktur erfassen und abgleichen zu können. In Abbildung 2 ist der analysierte Clip mit seinen Abmessungen dargestellt.

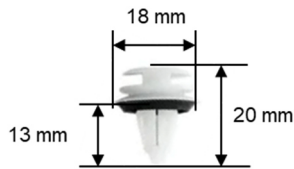


Abbildung 2: Analysierter Clip für eine Türverkleidung.
Quelle: Okzam GmbH, URL: <https://okzam.de/products/28714>.

Numerische Simulation der Teststruktur

Durch die numerische Modalanalyse kann überprüft werden, ob Resonanzfrequenzen der Teststruktur im relevanten Frequenzbereich auftreten. Die Teststruktur ist mit 184275 CTETRA(10) Elementen vernetzt [5]. Für das Material wird Aluminium mit der Dichte ρ von 2711 kg/m³ und dem Elastizitätsmodul E von 69 GPa angenommen. Abbildung 3 zeigt die ersten fünf Eigenmoden und Eigenfrequenzen aus der numerischen Modalanalyse der frei-frei gelagerten Teststruktur. Die Analyse zeigt, dass die ersten beiden Moden nicht angeregt werden können, da der gewählte Anregungspunkt im experimentellen Aufbau auf der Rückseite der Teststruktur in einem Knotenpunkt liegt.

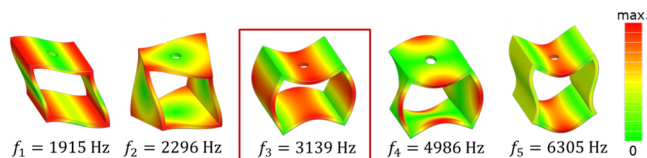


Abbildung 3: Eigenmoden und Eigenfrequenzen der Teststruktur aus der numerischen Modalanalyse.

Die Messung mit dem Laservibrometer bestätigen dieses Ergebnis, die in Abbildung 4 dargestellt ist. Für den Frequenzbereich bis 1000 Hz kann daher angenommen werden, dass die Resonanzen der Teststruktur keinen Einfluss auf das Verhalten des Clips aufweisen.

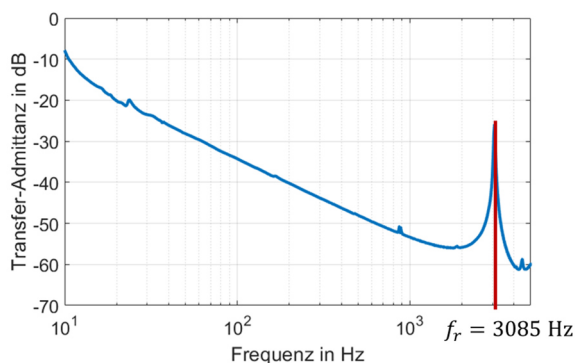


Abbildung 4: Transferadmittanz der Teststruktur.

Messergebnisse

In einer ersten Messung wird der Clip auf der Teststruktur angebracht und sowohl der Clip als auch die restliche Oberseite der Teststruktur vermessen, um den Einfluss des Clips auf die Teststruktur zu ermitteln. Die Anwesenheit des Clips verringert die Schwinggeschwindigkeit auf der umliegenden Strukturoberfläche um weniger als 0,5 dB. Der Einfluss des Clips auf die Teststruktur kann demnach als sehr gering angesehen werden.

Um das Gewicht der Verkleidung zu simulieren, werden in einer weiteren Messung zwei verschiedene Massen ($m_1 = 84$ g, $m_2 = 176$ g) mit dem Clip verschraubt. Der Masseinfluss auf die Transfer-Admittanz ist in Abbildung 5 dargestellt, wobei die Schwinggeschwindigkeit v_{vib} auf dem Clip bzw. auf der jeweiligen Masse gemessen wird. Die kleinere Masse m_1 reduziert die Transfer-Admittanz um ca. 5 dB im Frequenzbereich von 17 Hz bis 200 Hz und erzeugt eine Resonanz bei 550 Hz. Die größere Masse m_2 reduziert die Transfer-Admittanz um ca. 10 dB im Frequenzbereich von 10 Hz bis 200 Hz und erzeugt eine Resonanz bei 464 Hz. Die Zusatzmasse und der Clip wirken wie ein zusätzlich an der Teststruktur angebrachter Einmassenschwinger, weshalb im Bereich um die Resonanzfrequenz eine Erhöhung der Transfer-Admittanz stattfindet.

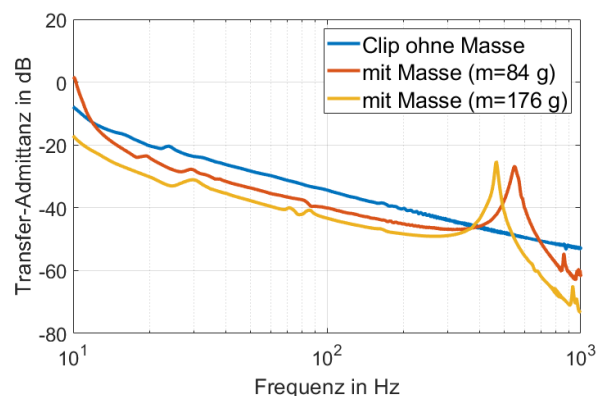


Abbildung 5: Masseneinfluss auf die Transfer-Admittanz durch auf den Clip angebrachte Massen.

Moderne Clips für Tür- und Heckklappen besitzen zum Schutz des Trockenbereichs vor Nässe und Feuchtigkeit einen Elastomer-Dichtungsring. Elastomere werden auch zwischen zwei Bauteilen eingesetzt, um Schwingungen zu entkoppeln. Ob dies auch für den Dichtungsring des Clips gilt, wird durch die Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes untersucht. Dieses ist in Abbildung 6 aufgetragen. Gemessen wird die Schwinggeschwindigkeit auf der Masse m_2 , die an den Clip angebracht ist. Das Maß der Einfügungsdämpfung weist im Frequenzbereich von 10 Hz bis 400 Hz Werte zwischen -1 dB und 1 dB auf. Oberhalb von 400 Hz lässt sich erkennen, dass nur in einzelnen Frequenzen auch Werte zwischen -3 dB und 3 dB erreicht werden. Daraus lässt sich schließen, dass der Dichtungsring keinen nennenswerten Einfluss auf die Schwinggeschwindigkeit hat.

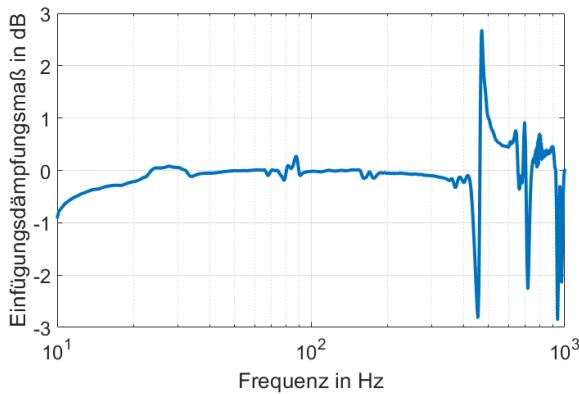


Abbildung 6: Einfügungsdämpfungsmaß – Einfluss des Dichtrings bei einem Clip mit $m_2 = 176$ g.

Das Durchgangsdämpfungsmaß für den Clip ist in Abbildung 7 dargestellt. Dabei wird die Schwinggeschwindigkeit auf dem Clip v_{clip} bzw. auf der Masse \bar{v}_m zur gemittelten Schwinggeschwindigkeit auf der Struktur \bar{v}_S ins Verhältnis gesetzt. Es ist zu erkennen, dass sich die Durchgangsdämpfung verändert, wenn eine Masse am Clip angebracht ist. Die Durchgangsdämpfung für den Clip ohne Masse zeigt über den betrachteten Frequenzbereich keine deutliche Veränderung. Die Durchgangsdämpfung beim Clip mit $m_1 = 84$ g zeigt deutliche Wirkung nach dem Nulldurchgang bei 530 Hz und beim Clip mit $m_2 = 176$ g nach dem Nulldurchgang bei 380 Hz. Die Dämpfungswirkung tritt somit bei größerer Masse früher ein.

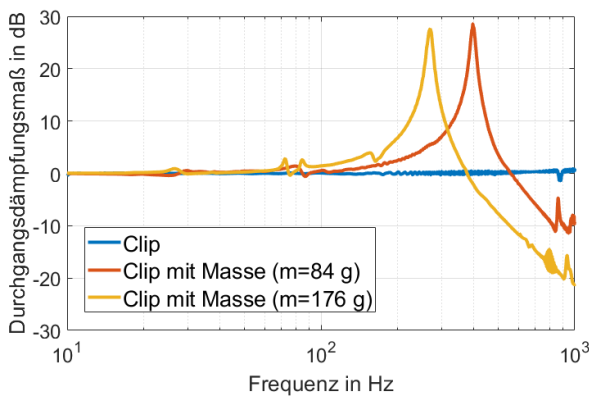


Abbildung 7: Durchgangsdämpfungsmaß des Clips.

Eine Abkopplung wird z. B. mit Elastomer-Metallelementen erreicht. Das in Abbildung 8 dargestellte Elastomer-Metallelement wird anstelle des Clips mit der Teststruktur verschraubt. In Abbildung 9 ist die Transfer-Admittanz sowohl für die Clipverbindung als auch für die Elastomer-Metallelement-Verbindung mit einer angebrachten Zusatzmasse von $m_1 = 84$ g über der Frequenz aufgetragen. Es zeigt sich, dass bei der Verwendung von Elastomer-Metallelementen im Vergleich zur Clipverbindung im tieffrequenten Bereich bis 25 Hz und ab der Resonanzfrequenz höhere Schwingungsminderung erzielt werden kann.

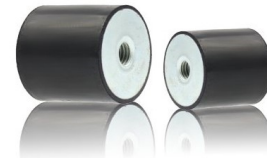


Abbildung 8: Elastomer-Metallelement, Quelle: WTB Wagner Technik Berlin, URL: <https://www.gummipuffer-wagner.de/> Gummipuffer-Typ-C

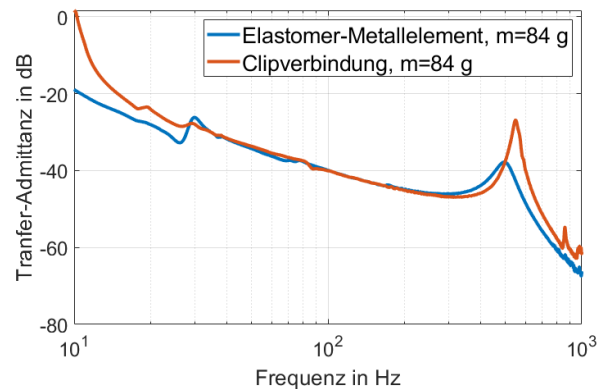


Abbildung 9: Transfer-Admittanz für das Elastomer-Metallelement im Vergleich zur Clipverbindung bei $m_1 = 84$ g.

In Abbildung 10 ist das Durchgangsdämpfungsmaß für ein Elastomer-Metallelement mit der Masse m_1 dargestellt. Die Hauptdämpfungswirkung tritt wie beim Clip erst im überkritischen Bereich nach der Resonanz ($f > \sqrt{2} \cdot f_r$) ein. Der überkritische Bereich beginnt in diesem Fall ab 500 Hz. Die Verwendung eines Elastomer-Metallelement bringt im Vergleich zur Clipverbindung somit nur geringe Vorteile.

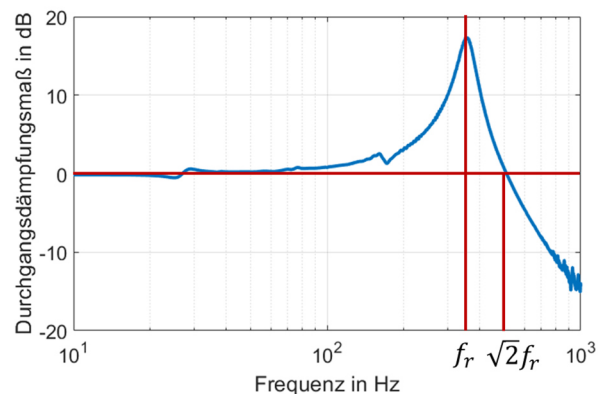


Abbildung 10: Durchgangsdämpfungsmaß des Elastomer-Metallelements mit $m_1 = 84$ g.

Eine weitere Untersuchung wird zur Bestimmung der Unsicherheit durch die Montage und Demontage eines Clips durchgeführt. Abbildung 11 zeigt die Admittanz nach dem ersten, zweiten, fünften und zehnten Einbau desselben Clips im Bereich der Resonanzfrequenz. Gemessen wird die Schwinggeschwindigkeit auf der Masse m_1 . Abweichungen durch die Montage und Demontage treten nur in geringem

Maß auf. Beispielsweise beträgt die höchste Frequenzabweichung in der Resonanzfrequenz ca. 1% nach dem 2. Einbau. Dies lässt sich mit der Verringerung der Steifigkeit der Clipverbindung durch die Demontage nach dem ersten Einbau und der zweiten Montage erklären. Aufgrund der geringen Abweichung in den Kurven, kann der Einfluss der Montage vernachlässigt werden.

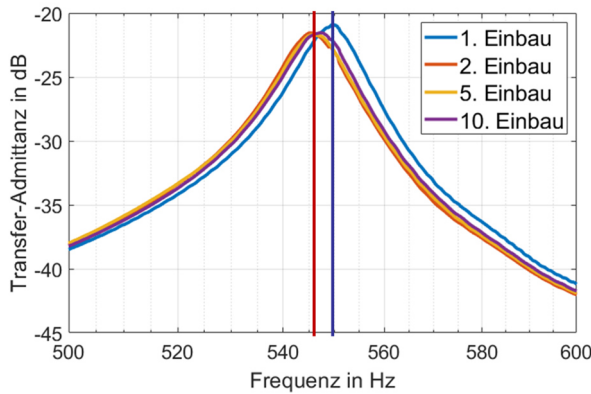


Abbildung 11: Unsicherheit durch Montage des Clips mit $m_1 = 84$ g.

- [3] DIN EN ISO 11691 (2020): Akustik – Messung des Einfügungsdämpfungsmaßes von Schalldämpfern in Kanälen ohne Strömung – Laborverfahren der Genauigkeitsklasse 3
- [4] DIN EN ISO 15667: Akustik – Leitfaden für den Schallschutz durch Kapseln und Kabinen
- [5] Siemens AG: Simcenter Nastran Element Library Reference, URL: https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/scnastran/2020_1/help/tdoc/en_US/pdf/element.pdf

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird der Einfluss eines Clips von Fahrzeuginnenverkleidungen untersucht und das Einfügungsdämpfungsmaß und das Durchgangsdämpfungsmaß am Clip bestimmt. Dazu wird ein Prüfstand aufgebaut, bei dem die Schwingungen mit einem 1D-Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer aufgenommen werden. Die Messungen mit Zusatzmasse verdeutlichen, dass auch die Masse der Verkleidung entscheidend für die Lage der Resonanz ist. Die Lage der Resonanz ist wiederum entscheidend, ab wann eine Dämpfungswirkung erreicht werden kann. Eine höhere Masse der Verkleidung und niedrigere Steifigkeit führt zu einer niedrigeren Resonanzfrequenz und somit zu einer tiefer frequenten Dämpfungswirkung. Elastomer-Metallelemente sind als Clipersatz nur dann zu empfehlen, wenn Frequenzen im überkritischen Bereich zu reduzieren sind, da hier ihre Hauptdämpfungswirkung einsetzt.

In Folgearbeiten wird ein vereinfachtes Verkleidungsmodell untersucht, das über mehrere Clips an einer Plattenstruktur angebracht und angeregt wird, um diese Wirkkette hinsichtlich Luftschall-/ Körperschallübertragung näher zu analysieren.

Literatur

- [1] Abolfathi, A.: The uncertainty in stiffness and damping of an automotive vehicle's trim-structure mounts and its effect on the variability of the vibration transfer function. *J Mechanical Engineering Science* 232 (2018), 2587-2598
- [2] DIN EN ISO 7235 (2009): Akustik – Labormessungen an Schalldämpfern in Kanälen – Einfügungsdämpfung, Strömungsgeräusch und Gesamtdruckverlust