

# Nutzung des akustischen Fenster- und Deckenprüfstands zur Entwicklung und Auslegung von Dämmungs- und Dämpfungsbauteilen bei Volkswagen

Dr. Silje Korte<sup>1</sup>, Uwe Schievelbusch<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Volkswagen AG, 38436 Wolfsburg, E-Mail:silje.korte@volkswagen.de

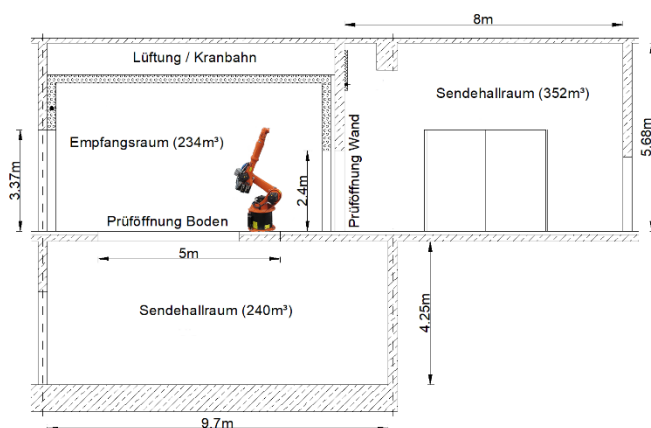
<sup>2</sup> Volkswagen AG, 38436 Wolfsburg, E-Mail:uwe.schievelbusch@volkswagen.de

## Fenster- und Deckenprüfstand bei VW

Mit dem Bau eines Akustikzentrums bei Volkswagen am Standort Wolfsburg wurde im Jahr 2003 auch ein akustischer Fenster- und Deckenprüfstand in Betrieb genommen.

Mit dem Prüfstand hat die Akustik die Möglichkeit bekommen, Dämpfungsbauteile effizient, schnell und kostengünstig zu entwickeln und zu beurteilen und neue Dämpfungskonzepte in frühen Konzeptphasen zu validieren.

Der Fensterprüfstand besteht aus zwei Senderäumen und einem Empfangsraum, die jeweils über eine Boden- bzw. Deckenöffnung miteinander verbunden sind. Bei den Senderäumen handelt es sich um Hallräume mit einer unteren Grenzfrequenz von 63 Hz. Der Empfangsraum ist als reflexionsarmer Raum mit einer unteren Grenzfrequenz von 125 Hz ausgeführt. Die Bodenöffnung ist von der Größe her so konzipiert, dass die gesamte Bodengruppe eines Fahrzeugs eingefasst in einen Rahmen verbaut werden kann. Die Prüföffnung in der Wand ist für einen Vorderwagen bzw. ein Seitenteil ausgelegt (siehe Abbildung 1). Parallel zur Öffnung für den Vorderwagen ist eine weitere Öffnung vorhanden, die zur Prüfung von Komponenten wie Tüllen oder Stopfen dient.



**Abbildung 1:** Aufbau des Fenster- und Deckenprüfstands im Akustikzentrum in Wolfsburg

Die Anregung in den Senderäumen erfolgt mit Dodekaedern und Hochtönern, die ein breitbandiges Rauschen mit einem maximalen Summenpegel von ca. 120 dB abstrahlen. Dabei ist das Rauschen so ausgelegt, dass es ab 1000 Hz mit der Frequenz ansteigt, um bei steigender Schalldämmung des Prüfobjekts trotzdem noch mit einem ausreichenden Signal-Rausch-Abstand zu messen. Der Schalldruckpegel im Senderaum wird über eine kontinuierliche Messung an vier Mikrofonpositionen erfasst, über die zur Berechnung des Schallleistungspegels im Senderaum gemittelt wird.

## Messung der Schallintensität

Zur Messung im Empfangsraum stehen zwei Schallintensitätsmesssonden zur Verfügung: Zum einen eine 1D-pp-Messsonde und zum anderen eine 3D-pu-Messsonde. Beide können an einem Sondenhalter befestigt werden, der mittels eines sechssachsigen Industrieroboters ein Abtasten der Messfläche an diskreten Punkten in einem definierten Abstand vom Prüfobjekt ermöglicht.

Die konventionelle Doppelmikrofon-(1D-pp)-Schallintensitätssonde kommt hauptsächlich für ebene Messflächen zum Einsatz. Bei diesen Messungen ist eine räumliche Auflösung des Energieflusses nicht von entscheidender Bedeutung, aber eine hohe Schalldämmung im hohen Frequenzbereich muss messbar sein. Zudem ist mit einer 1D-pp-Intensitätsmesssonde eine normgerechte Messung möglich. Die 3D-pu-Intensitätsmesssonde wird dann verwendet, wenn bei einer konturgenauen Messung auch die Richtung des Energieflusses zum Beispiel im Rahmen einer Schwachstellenanalyse wichtig ist. Die 3D-pu-Schallintensitätssonde der Fa. Microflown ist durch Messung des Schalldruckes mit einem zentralen Mikrofon und drei orthogonal angeordneten Hitzdrahtsensoren zur Messung der Schallschnelle in der Lage, die Schallintensität für alle drei Raumrichtungen zeitgleich zu bestimmen, so dass die Ausrichtung der Sonde zum Prüfobjekt beliebig ist. Die Dynamik im hohen Frequenzbereich ist aufgrund des zunehmenden Eigenrauschens der Sonde mit steigender Frequenz begrenzt. Großer Vorteil der Sonde ist ihre kompakte Bauweise, so dass damit auch in relativ engen Bauräumen gemessen werden kann.

## Erstellung von Fahrprogrammen und Messgeometrien

Die Erstellung der Fahrprogramme für den Roboter erfolgt mit Hilfe von CAD-Daten und einem Grundfahrprogramm. Dazu werden die CAD-Daten des Einbaus mit einer Hülle im gewünschten Abstand zur Struktur versehen. Durch Vereinfachen, Beschneiden und eine passende Vernetzung entsteht daraus die Messfläche, die von der Sonde abgetastet werden soll. Diese besteht aus Dreiecken ungefähr gleicher Größe.

Die Koordinaten der Flächenmittelpunkte werden in ein Grundfahrprogramm des Roboters eingefügt, das bereits die wesentliche Fahrbefehle zum Anfahren der Messfläche und für einige Referenzpunkte mit den passenden Ausrichtungen der Sonde enthält. Die Sondenaustrichtung orientiert sich an den Notwendigkeiten der Messaufgabe und der Zugänglichkeit der Messpunkte. Eine nicht-flächennormale Ausrichtung der pu-Intensitätsmesssonde wird bevorzugt, um für alle Kanäle ein relevantes Messsignal zu erhalten, während bei der Messung mit der pp-Intensitätsmesssonde die Sondenaustrichtung immer senkrecht zur Messfläche ist.

In einem letzten Schritt wird aus der Messfläche eine Geometrie für das Mess- und Auswertesystem erzeugt.

## Messung und Auswertung

Die Messungen und Auswertungen erfolgt mit der Software PAK der Fa. MüllerBBM. Die Messdauer pro Messpunkt beträgt zehn Sekunden, so dass sich bei Fahrprogrammen zwischen 50 und 550 Messpunkten Messzeiten zwischen 15 Minuten und drei Stunden ergeben. Die Messungen erfolgen unbeaufsichtigt im Automatikbetrieb.

Vor der Auswertung erfolgt eine Überprüfung der Messdaten: Zum einen wird kontrolliert, ob der Schalldruckpegel im Senderraum über die Dauer der Messung konstant geblieben ist. Zum anderen wird mit Hilfe eines Referenzmikrofons im Empfangsraum überprüft, dass keine Störgeräusche aufgetreten sind.

Für die Auswertung können verschiedene Größen und Darstellungen herangezogen werden. Standardmäßig wird das Schalldämmmaß als Differenz zwischen dem mittleren Schallleistungspegel im Senderraum und dem mittleren Schallleistungspegel im Empfangsraum betrachtet. Hierbei wird dieser über die gesamte Messfläche des Prüfobjekts gemittelt. Zusätzlich ist eine Auswertung von Teilflächen möglich. Dies kann zum Beispiel sinnvoll sein, wenn Unterschiede zwischen Messungen hauptsächlich auf der Beifahrerseite eines Vorderwagens auftreten, dieser Bereich aber nicht pegelbestimmend für den Gesamtpegel ist.

Weiterhin kann das Einfügedämmmaß bestimmt werden, bei dem die Messungen auf einen Referenzzustand bezogen werden, zum Beispiel auf ein 1 mm dickes Blech. Durch die Reduzierung der Steigung der Spektren ist hier eine größere Spreizung in der Darstellung möglich, so dass Unterschiede deutlicher zutage treten.

Besonders bei Messungen mit der 3D-Intensitätsmesssonde ist eine Darstellung von Intensitätskartierungen hilfreich, bei der die gesamte Messfläche dargestellt wird. Pro Terz wird der Pegel durch eine Farbskala repräsentiert und die Richtung des Energieflusses über Pfeile (Vektoren). Hierüber können Schwachstellen gut lokalisiert werden beziehungsweise Variantenvergleiche von lokalen Änderungen dargestellt werden. Auch hier ist eine Differenzdarstellung zu einem Referenzbaustand möglich, wodurch lokale Änderungen besonders deutlich zu Tage treten.

## Anwendungen

Die Messungen im Fenster- und Deckenprüfstand sind in der Volkswagen-Akustik fester Bestandteil des Entwicklungsprozesses für neue Fahrzeugprojekte. In den vergangenen fünf Jahren wurden in den Prüfständen mehr als 300 Messungen pro Jahr durchgeführt. Dadurch konnte die Anzahl der Fahrzeugmessungen wesentlich reduziert werden. Der Prüfstand wird unter anderem genutzt für:

- Systemvergleiche von Dämmungsbauteilen: Bauteile mit unterschiedlichem Materialaufbau werden bezüglich ihrer Schalldämmung in einem Vorderwagen oder auf einer Bodengruppe im Prüfstand verglichen.

- Durchbruchs- und Optimierungsanalysen: Wo im Vorderwagen bzw. an einer Bodengruppe besteht noch Optimierungsbedarf und welche Relevanz hat welcher Durchbruch in welchem Frequenzbereich.
- Überprüfung von akustischen Vorgaben einzelner Komponenten: Im Komponentenprüfstand (kleine Öffnung neben der Wandöffnung für den Vorderwagen) wird ein Einzelbauteil vermessen und mit der internen akustischen Vorgabe für dieses Bauteil verglichen.
- Schneller Vergleich von Maßnahmen: Stehen für die Verbesserung eines Bauteils oder Durchbruchs unterschiedliche Maßnahmen zur Diskussion, so kann deren Wirkung auf das Schalldämmmaß in einem der Prüfstände schnell überprüft werden und über eine konturgenaue Messung können auch die verbleibenden Schwachstellen geortet werden.
- Validierung von Simulationsrechnungen.
- Grundsatzuntersuchungen zur Materialcharakterisierung an Plattenmaterial im Deckenprüfstand.

Die Vorteile der Prüfstandmessungen gegenüber Fahrzeugmessungen sind:

- Konstante Randbedingungen - insbesondere von Temperatur und Luftfeuchtigkeit - und eine hohe Positioniergenauigkeit der Messsonde führen zu einer hohen Reproduzierbarkeit der Messergebnisse.
- Umbauten im Prüfstand lassen sich wesentlich zügiger durchführen als im Fahrzeug, da im Prüfstand viele Anbauteile wie Kabel und Steuergeräte nicht verbaut sind. Somit können im Prüfstand zahlreiche Varianten vermessen werden, um dann die vielversprechendsten zusätzlich im Fahrzeug zu testen.
- Im Prüfstand können Bauzustände aufgebaut werden, die im Fahrzeug nicht fahrbar sind, z.B. maximal verschlossene Durchbrüche.
- Es sind Messungen an Komponenten in einer Entwicklungsphase möglich, in der noch keine Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

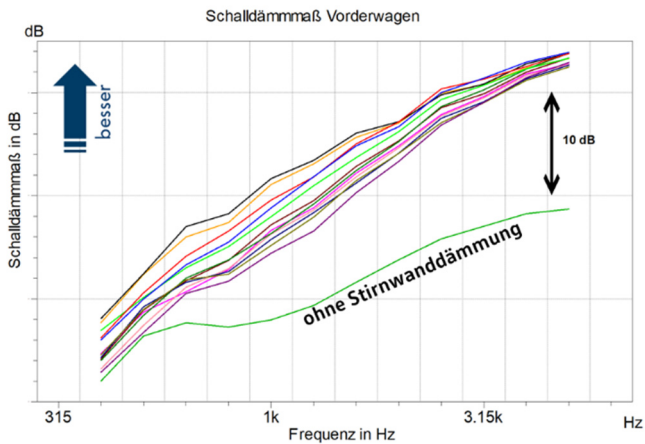
Bei der Interpretation der Messergebnisse muss berücksichtigt werden, dass im Prüfstand alle Flächen im Motorraum gleichmäßig beschallt werden und nicht - wie im realen Fahrbetrieb - unterschiedliche Pegel an unterschiedlichen Stellen im Motorraum herrschen. Je nach Einbaulage des Fahrzeugs im „Fenster“ werden auch Flächen außerhalb des Motorraums (Frontscheibe, Tunnel, A-Säulen, usw.) beschallt, die entweder zusätzlich gedämmt werden müssen oder bei den Messergebnissen einen größeren Einfluss suggerieren als er im Fahrbetrieb des Fahrzeugs vorhanden ist. Außerdem fehlt im Prüfstand im Normalfall der Körperschallanteil. Diese Randbedingungen müssen bei der Übertragung der Ergebnisse auf das Fahrzeug berücksichtigt werden. Dennoch haben zahlreiche Vergleiche eine gute Übertragbarkeit der Prüfstandsergebnisse auf Gesamtfahrzeugmessungen im Fahrbetrieb gezeigt.

## Messergebnisse

Im Folgenden werden Untersuchungen aus dem Fenster- und dem Komponentenprüfstand vorgestellt, die repräsentativ für die Entwicklungsarbeit an Dämmungs- und Dämpfungsbauteilen sind.

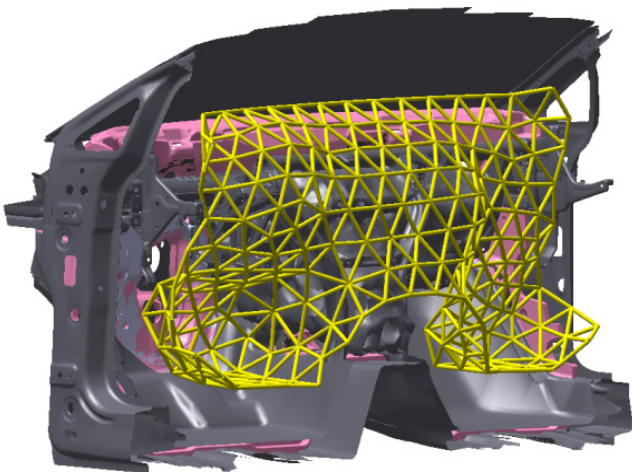
### Fensterprüfstand / Vorderwagen

Das erste Beispiel (Abbildung 2) zeigt einen Systemvergleich von weltweit verfügbaren Stirnwanddämmungen einer Fahrzeugplattform, die konzernweit im Einsatz ist.



**Abbildung 2:** Schalldämmmaß von weltweit verfügbaren Stirnwanddämmungen einer Fahrzeugplattform gemessen im Vorderwagen

Dargestellt ist das Schalldämmmaß unterschiedlicher Stirnwanddämmungen sowie eine Messung ohne Stirnwanddämmung. Die Messungen wurden mit der 3D-pu-Intensitätsmesssonde durchgeführt. Das Fahrprogramm war konturfolgend in einem Abstand von ca. 10 cm vor der Bauteiloberfläche und beinhaltete ca. 400 Messpunkte (Abbildung 3).

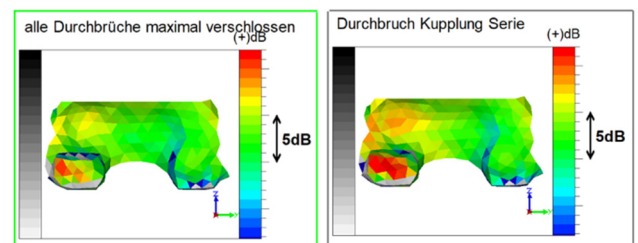
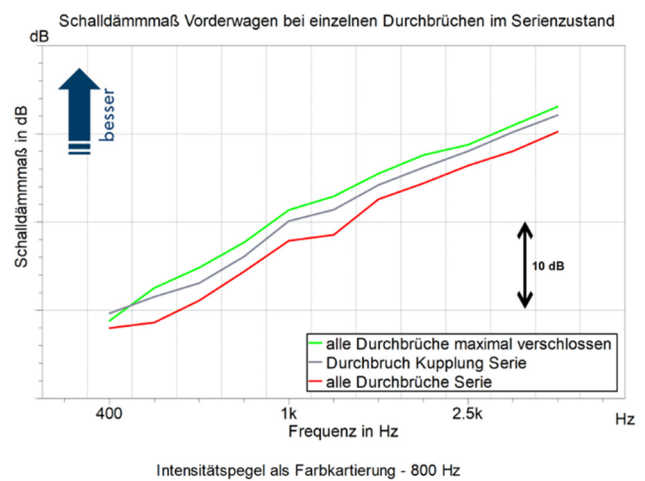


**Abbildung 1:** Darstellung des Messgitters für die Messungen am Vorderwagen im Fensterprüfstand

Obwohl es sich jeweils um ein geometrisch identisches Bauteil handelt, erkennt man große Unterschiede von bis zu 7 dB im Schalldämmmaß. Die große Bandbreite erklärt sich durch weltweit unterschiedliche Marktanforderungen,

Rohstoffverfügbarkeiten und Herstellungsverfahren. Die geringere Differenz der Kurven im hohen Frequenz ist auf den Prüfstands Aufbau zurückzuführen. Der mit der Frequenz steigende Abstand der Schalldämmmaße mit einer beliebigen Stirnwanddämmung gegenüber der Messung ohne Stirnwanddämmung zeigt die hohe Wirksamkeit des Bauteils für die Isolation des Vorderwagens.

Das zweite Beispiel (Abbildung 4) zeigt ein Ergebnis einer Durchbruchanalyse an einem Fahrzeugvorderwagen. Ziel der Analyse ist es, den Beitrag jedes einzelnen Durchbruchs (hier am Beispiel Kupplungspedal) zum Schalldruckpegel im Innenraum im Bezug zur Serienstirnwanddämmung in Abhängigkeit der Frequenz zu ermitteln. Dazu werden konturgenaue Messungen an einem Vorderwagen mit verbauter Stirnwanddämmung durchgeführt. Die Messungen erfolgen wie beim ersten Beispiel mit der 3D-pu-Sonde mit identischem Fahrprogramm.



**Abbildung 4:** Schalldämmmaß eines Vorderwagens, wenn einzelne Durchbrüche (hier Kupplungspedal) in den Serienzustand versetzt werden sowie die dazu gehörende Farbkartierung des Intensitätspegels bei 800 Hz

Im ersten Schritt sind bei der Messung alle Durchbrüche maximal verschlossen. Danach wird jeder Durchbruch einzeln in den Serienzustand versetzt und erneut eine konturgenaue Messung durchgeführt. Zur Kontrolle und als (theoretische) Untergrenze des Schalldämmmaßes wird in einem letzten Schritt noch eine Messung mit allen Durchbrüchen im Serienzustand durchgeführt.

Bei der Auswertung des Schalldämmmaßes dieser Messungen wird an der Differenz der Spektren „alle Durchbrüche Serie“ und „alle Durchbrüche maximal verschlossen“ die Relevanz der Durchbrüche insgesamt erkannt.

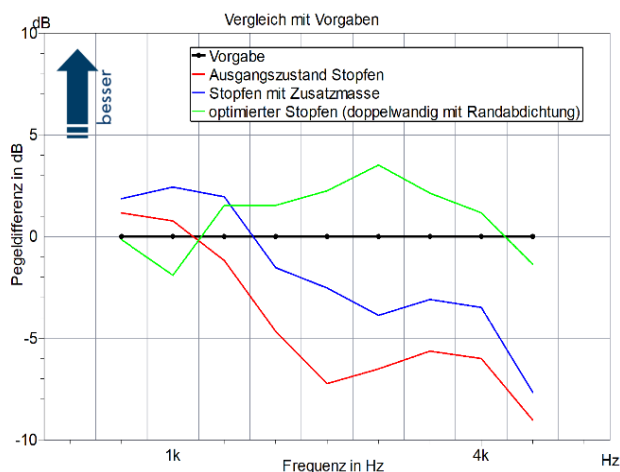
Diese Differenz gibt auch Aufschluss darüber, ob eine Verbesserung der Stirwanddämmung über z.B. die Erhöhung der Schwerschichtmasse zu einer Verbesserung der Gesamtschalldämmung führen wird, oder ob vielmehr zunächst die Schalldämmung der Durchbrüche verbessert werden muss, bevor eine schwerere Stirwanddämmung wirken kann.

Um nun herauszufinden, ob die Differenz zwischen den Schalldämmmaßen mit maximal verschlossenen Durchbrüchen und Serierendurchbrüchen durch einen Durchbruch bestimmt wird oder die Summe mehrerer Schwachstellen darstellt, muss die Messung jedes einzelnen Durchbruchs im Serienzustand den beiden anderen Messungen gegenübergestellt werden (hier: Kupplungspedal). Dieser mindert das Schalldämmmaß im Frequenzbereich ab 500 Hz gegenüber den maximal verschlossenen Durchbrüchen um 1-2 dB. Aus der Differenz zum Schalldämmmaß mit allen Durchbrüchen im Serienzustand erkennt man, dass der Kupplungspedalbock jedoch nicht allein pegelbestimmend in diesem Frequenzbereich ist.

Die Farbkartierung der Intensitätspegel, hier beispielhaft für die 800 Hz-Terz dargestellt, dient in diesem Fall der Kontrolle der Messung: die Unterschiede zwischen den maximal verschlossenen Durchbrüchen und dem Kupplungspedalbock im Serienzustand treten tatsächlich an der Position des Kupplungspedalbocks auf. Die Pegelunterschiede im oberen Bereich der Kartierung auf der Fahrerseite sind auf die Abstrahlung des Pedalbocks auch nach oben zurückzuführen.

### Komponentenprüfstand

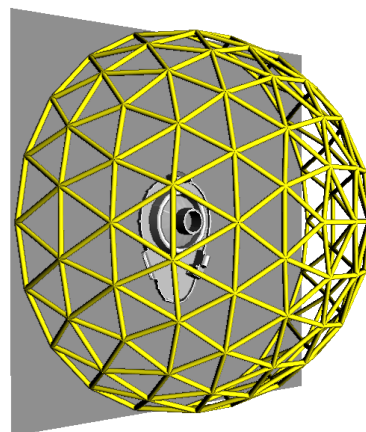
Das dritte Beispiel (Abbildung 5) sind Messungen an einem großflächigen Stopfen aus dem Komponentenprüfstand.



**Abbildung 5:** Pegeldifferenz in dB zwischen einem 1 mm dicken Stahlblech und einem Blech mit Stopfen mit unterschiedlichen Optimierungsmaßnahmen.

Der Stopfen ist in einem 1mm dicken Stahlblech eingebaut, welches zur Empfangsraumseite zusätzlich gedämmt ist.

Die Messungen erfolgen mit der 3D-pu-Intensitätsmesssonde und die geschlossene Messfläche aus 160 Messpunkten liegt halbkugelförmig (Durchmesser 35 cm) um den Stopfen (Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Darstellung des Messgitters für die Messungen des Stopfens im Komponentenprüfstand

Ziel und Vorgabe ist an dieser Stelle, dass die Schalldämmung des Stopfens mindestens so gut wie ein 1 mm dickes Stahlblech sein soll. Daher wird zur Auswertung eine Pegeldifferenz aus der Messung eines geschlossenen 1 mm dicken Stahlblechs und dem Stahlblech mit Stopfen gebildet.

Hierbei ist zu erkennen, dass diese Vorgabe ab 1,25 kHz deutlich unterschritten wird. Daher wird der Stopfen durch Zusatzmaßnahmen optimiert. Die Erhöhung der Masse des Stopfens erhöht die Schalldämmung im gesamten betrachteten Frequenzbereich, ab 1,6 kHz wird die Vorgabe jedoch immer noch unterschritten. Wird statt der Zusatzmasse eine doppelwandige Konstruktion mit Randabdichtung erstellt, so erhöht sich die Schalldämmung in einem breiten Frequenzbereich. Die Vorgabe wird damit - bis auf einen Einbruch bei 1 kHz - erfüllt.

### Zusammenfassung

Die Verwendung des akustischen Fensterprüfstands der Volkswagen AG zur Entwicklung von Dämmungs- und Dämpfungsbauteilen wurde an unterschiedlichen Beispielen aufgezeigt: Untersuchungen an Stirnwanddämmungen, Durchbruchanalysen an einem Vorderwagen sowie Messungen zur Bauteiloptimierung am Komponentenprüfstand.

Der Fenster- und Deckenprüfstand hat sich als sehr nützliches Instrument erwiesen, mit dem sowohl projektübergreifende Grundsatzuntersuchungen durchgeführt werden als auch Messungen zur Bauteilentwicklung und Bauteilauswahl für einzelne Fahrzeugprojekte erfolgen. Die Ergebnisse fließen kontinuierlich in die Bauteilentwicklung für Nachfolgeprojekte ein. Darüber hinaus werden mit Hilfe des Komponentenprüfstands Vorgaben für die Schalldämmung von Einzelbauteilen wie Tüllen und Stopfen gemacht und diese bereits in einer frühen Projektphase überprüft und die Bauteile optimiert.

Innerhalb des VW-Konzerns werden zurzeit weitere Fenster- und Deckenprüfstände in Betrieb genommen, so dass in Zukunft konzernweit ähnliche Untersuchungen durchführbar sind.