

Hochfrequente impulshaltige Geräusche bei Sportwagen mit direkteinspritzenden Ottomotoren

Gleb Kropatschew

Mercedes-AMG GmbH, 71563 Affalterbach, E-Mail: gleb.kropatschew@daimler.com

Einleitung

In einer modernen Oberklasselimousine sind zahlreiche state-of-the-art Technologien kombiniert, die Geräusch- und Schwingungskomfort auf das höchste Niveau bringen. Doch wie schaut es mit Sportfahrzeugen aus? Sind es immer noch puristische Fahrmaschinen, die einfach nur laut sind? Diese Frage kann heute eindeutig mit „nein“ beantwortet werden. Ein moderner Kunde möchte das Fahrzeug nicht nur im fahrdynamischen Grenzbereich bewegen und Bestzeiten auf Rennstrecken erreichen, sondern auch im normalen Straßenverkehr unterwegs sein und dabei auf keinen Fall auf Komfort verzichten. Ein Sportfahrzeug aus dem Premiumsegment muss diese Bedingung erfüllen.

Geräuschkomfort umfasst zahlreiche Phänomene, die sich sowohl im Klangcharakter als auch im Betriebszustand unterscheiden. Trotz moderner Technologien wie Start-Stopp ist der Motorleerlauf oder der leerlaufnahe Bereich ein wichtiger Betriebszustand. Impulsartige Geräusche spielen dabei eine besonders große Rolle.

Um die Zielwerte hinsichtlich Leistung und Drehmoment zu erreichen und gleichzeitig Kraftstoffverbrauch und Emissionen zu reduzieren sind moderne Ottomotoren auf Direkteinspritzung angewiesen. Einzelkomponenten des Einspritzsystems (z.B. Hochdruckpumpe und Hochdruck-Einspritzventile) sind technisch hochkomplexe Bauteile, die impulsbehaftete Anregungsmechanismen aufweisen [1]. Diese emittieren bei niedrigen Drehzahlen im Fahrzeuginnenraum und im Außengeräusch hörbare oder gar störende Geräusche, falls keine NVH-Maßnahmen eingeleitet werden. Solche Geräusche sind im Frequenzbereich von ca. 2 kHz bis hin zur Obergrenze des hörbaren Bereichs angesiedelt und werden im Allgemeinen als „Tickern“ bezeichnet.

Einflussfaktoren

Automobile werden mit jedem Modellwechsel und bei jeder Modellpflege immer ein Quäntchen reifer. Es kommen immer mehr neue Features dazu und auch die bestehenden Komponenten und Funktionen werden optimiert. Einen fortschreitenden Entwicklungsprozess kann man auch in punkto Geräuschkomfort beobachten. Vorwiegend im Sportwagenbereich hat sich in der letzten Zeit viel getan. Ein Sportwagen von vor zehn Jahren ist mit einem modernen Sportfahrzeug nicht mehr vergleichbar, was den Geräuschkomfort anbelangt.

Ein Fahrzeug aus dem Hause Mercedes-AMG muss die Daimler-konzernweiten Anforderungen an Geräuschkomfort erfüllen. Doch was genau steckt dahinter und was ist die Herausforderung für die Entwickler von solchen Fahrzeugen?

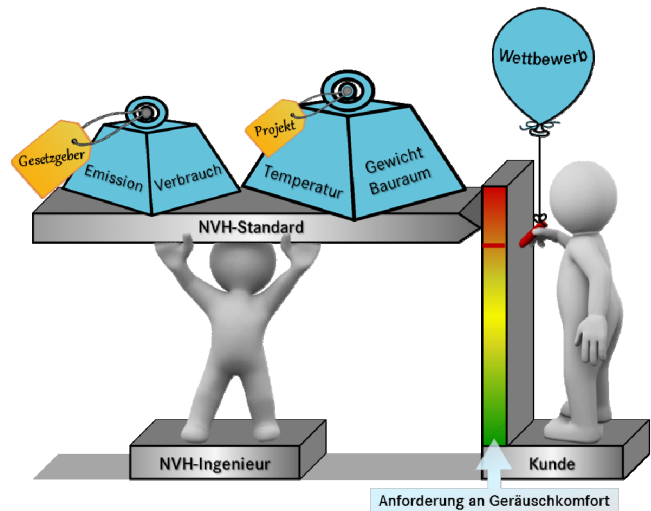


Abbildung 1: Einflussfaktoren der NVH-Entwicklung

Der wichtigste Einflussfaktor ist der Kundenanspruch. Der Kunde definiert das Ziel für den Automobilhersteller, denn letztendlich zahlt er auch dafür. Dies gilt für die meisten Sportwagenhersteller, daher fällt dem Kunden die Zieldefinition etwas leichter. Der Wettbewerb bestimmt die Höhe der „Messlatte“ so zu sagen mit.

Die Umsetzung der gestellten Ziele birgt einige Herausforderungen, die oft vom Gesetzgeber vorgegeben und zum Teil auch projektinterner Herkunft sind.

So werden beispielsweise die Abgasnormen von Jahr zu Jahr angepasst, was die Automobilentwickler zu neuen Technologien animiert, die zwar eine Erreichung der Emissions- und Verbrauchsziele ermöglichen, aber unter Umständen eine Anpassung des akustischen Verhaltens voraussetzen. Ein Beispiel dafür ist die Direkteinspritzung. Zweifellos sind es umweltschonende Technologien, die nicht in Frage gestellt werden dürfen. Diese sollten aber bereits in der frühen Entwicklungsphase berücksichtigt und ggfs. mit Maßnahmen versehen werden.

Wie schon erwähnt, werden nicht nur hohe Zielwerte hinsichtlich Akustik- und Schwingungskomfort definiert, sondern in allen möglichen Disziplinen. Dies führt zwangsläufig zu Zielkonflikten innerhalb des Projekts. So wird ganz besonders im Sportwagenbereich ein extrem großer Wert auf Leichtbau gelegt. Dies erschwert dem Fahrzeugakustiker vor allem die Arbeit mit Sekundärmaßnahmen. Daher muss bei der Werkstoffwahl und auch bei der Auslegung der Volumina von geräuschisolierenden Bauteilen stark auf Gewicht geachtet werden, was den Entwicklungsaufwand u.U. steigern kann.

Ein weiterer Aspekt, der bei einem Sportfahrzeug eine große Rolle spielt, ist die thermische Belastung von einigen Bauteilen. High-Performance-Motoren beanspruchen das Material auch unter thermischen Gesichtspunkten. Somit müssen alle zum Einsatz kommenden Materialien diesen Temperaturen standhalten.

Maßnahmen

Grundsätzlich lassen sich Geräuschminderungsmaßnahmen in zwei Kategorien unterteilen:

- Primärmaßnahmen und
- Sekundärmaßnahmen.

Unter Primärmaßnahmen versteht man Maßnahmen, welche die Schallentstehung entweder weitestgehend verhindern oder reduzieren. Es handelt sich größtenteils um Optimierung an der Quelle, d.h. an den Komponenten selbst [3]. Das bedeutet, dass Subsysteme des Hochdrucksystems oder deren Anbindung an Motor nach NVH-Gesichtspunkten ausgelegt werden. Somit sind Primärmaßnahmen reine Motormaßnahmen.

Als Sekundärmaßnahmen bezeichnet man Maßnahmen, die die Schallausbreitung reduzieren. Dabei handelt es sich meistens um Bauteile mit schallabsorbierenden Eigenschaften, die entweder am Motor in unmittelbarer Nähe des Abstrahlorts oder etwas weiter entfernt im Motorraum oder auch in der Fahrgastzelle angebracht werden.

Primärmaßnahmen

Das Geräuschverhalten der Einspritzsysteme wurde in den letzten Jahren allein durch Hardwareoptimierung erheblich verbessert, vorwiegend wurde dabei die Impulshaltigkeit beachtlich reduziert.

Der Hochdruckpumpen-Kolben wird von einem mehrfach-Nocken angetrieben, was eine oszillierende Bewegung zur Folge hat. Zusätzlich sind in der Pumpe elektromagnetische Ventile untergebracht, welche stoßartige Bewegungen ausführen. Diese Ventile sind für eine genaue Kraftstoffdosierung erforderlich. Systemzulieferer betreiben einen hohen Entwicklungsaufwand, um diese Subsysteme akustisch zu optimieren.

Nicht nur die Anregung der Systemkomponenten ist signifikant für Tickergeräusche, sondern auch die Befestigung der Bauteile auf dem Motor. Im Wesentlichen sollte bei der Auslegung des Zylinderkopfs bzw. der Zylinderkopfhaube eine hohe Eingangsimpedanz an den Krafteinleitungsstellen erzielt werden, um die Krafteinleitung in die Motorstruktur zu reduzieren.

Ein ungedämpftes Auftreffen der meist aus Metall bestehenden Bauteile mit hoher Endgeschwindigkeit erzeugt einen entsprechend starken Impuls, der entweder direkt von dem Bauteilgehäuse abgestrahlt oder in die Motorstruktur eingeleitet wird. Über eine intelligente Ansteuerung lässt sich die Auftreffgeschwindigkeit reduzieren und der Impuls entsprechend verringern. Beide Größen (Impuls und

Geschwindigkeit) stehen im proportionalen Verhältnis zueinander.

Nicht unwichtig ist auch der Kraftstoffdruck im System. Generell gilt: Je höher der Kraftstoffdruck, desto höher ist auch der Geräuschpegel. Demzufolge sollte im leerlaufnahen Betrieb der minimal zulässige Druck eingestellt werden.

Moderne Systeme ermöglichen mehrere Einspritzungen pro Arbeitstakt. Auch diese Betriebsmodi sind signifikant für Geräuschentstehung und müssen daher bei der Auslegung der Verbrennungsstrategie von einem Akustik-Ingenieur bewertet werden.

Sekundärmaßnahmen

Mit Primärmaßnahmen allein ist es derzeit noch nicht möglich, Tickergeräusche auf ein kundenfähiges Niveau zu reduzieren, daher muss auf Sekundärmaßnahmen zurückgegriffen werden.

Wie eingangs erwähnt, lassen sich die Sekundärmaßnahmen in Motor- und Fahrzeugmaßnahmen einteilen. Zu Motormaßnahmen gehören Bauteile, die direkt am Motor befestigt werden. Dazu zählen beispielsweise Kapseln über sämtlichen kraftstoffführenden Elementen. Typische Fahrzeug-Sekundärmaßnahmen sind Stirnwand-Absorber oder Innenraum-Abdämpfungen.



Abbildung 2: Geräuschabdämpfung aus Integralschaum

Die Werkstoffwahl ist sehr situationsabhängig und individuell. Ein verbreiteter Werkstoff ist der sogenannte Integralschaum. Dieser wird aus Polyurethan-Kunststoff (PUR) hergestellt. Dieser Schaumtyp hat sich seit Jahrzehnten in der Automobilindustrie etabliert und wird immer noch gerne für diverse NVH-Anwendungen verwendet. PUR-Integralschäume weisen in der Regel Raumgewichte zwischen 100 und 300 kg/m³ auf, was für heutige Verhältnisse bei steigendem Trend zum Leichtbau relativ hoch ist. Daher muss die Bauteilgeometrie besonders im Sportwagenbereich methodisch ausgearbeitet werden, um Materialanhäufungen explizit im Bereich der akustischen „hot spots“ zu erhöhen.

Seit einigen Jahren werden im Bereich Fahrzeugakustik Verbundwerkstoffe eingesetzt, die die konventionellen Bauteile aus PUR-Integralschaum ergänzen. Diese Werkstoffe bestehen aus mindestens zwei Schichten, die miteinander verklebt oder verpresst werden. Die sogenannte Trägerschicht besteht aus Faser-Pressverband und dient der Formstabilität sowie der Schalldämmung. Als innere Schicht wird ein offenzelliger Leicht- oder Weichschaumstoff eingesetzt, der gute schallabsorbierende Eigenschaften hat. Da hauptsächlich Schaumstoffe mit einem Raumgewicht zwischen 5 und 40 kg/m³ zum Einsatz kommen, sind die Verbundwerkstoffe deutlich leichter als konventionelle

Integralschäume und eignen sich daher besonders gut für Sportfahrzeuge.

Ein weiterer Trend in der Automobilentwicklung ist die immer stärkere Vereinigung von Hitzeschutz- und Schallschallschutzmaßnahmen. Faktisch bedeutet dies, dass Hitzeschutzkomponenten, die als Sandwich-Konstruktionen ausgeführt sind, mittels Perforation einer zum Strahler gerichteten Blechschicht als Schallsorber ausgelegt werden können, ohne dabei die Wärmeschutzeigenschaften maßgeblich zu verändern. Der Lochanteil sowie der Lochdurchmesser werden auf die abgestrahlte Frequenz abgestimmt. Das eingesetzte Material (z.B. Silikatfaser) verfügt sowohl über eine niedrige Wärmeleitfähigkeit als auch über gute Schallsorptionseigenschaften.

Messtechnische Erfassung und Bewertung

Vor einigen Jahren wurde bei Mercedes-AMG ein Standard definiert, in dem das Messverfahren für Aufnahmen des Leerlaufgeräuschs genau beschrieben wurde. Demnach wurde im Laufe der Jahre eine umfangreiche Geräusch-Datenbank erstellt, die momentan ein wichtiges Instrument in der NVH-Entwicklung darstellt. Die Analyse von Innenraumgeräuschen ist allerdings schwierig, denn das Phänomen Tickern ist kein klassischer Fall für Standard-Analysemethoden wie Fourier-Transformation oder Ordnungsanalyse. Derzeit existieren Methoden, die derartige Geräusche vom Motorgesamtgeräusch separieren können [2]. Um die Innenraum-Geräuschqualität im Hinblick auf das Phänomen Tickern nach Vorgaben von Mercedes-AMG objektiv bewerten zu können, wurde ein Tool entwickelt, das eine Einzelnote als Endergebnis ausgibt.

Dem Bewertungssystem lag ein umfassender Hörversuch mit einigen Dutzend Probanden zugrunde. Den Probanden aus unterschiedlichen Hierarchiestufen des Unternehmens wurden Geräuschaufnahmen aus verschiedenen Fahrzeugen abgespielt, deren Leerlauf-Geräuschqualität auf einer Skala von 1 bis 9 hinsichtlich des Phänomens Tickern bewertet werden sollte. Als Orientierungshilfe wurden den Probanden sogenannte Ankergeräusche angeboten, die von einer Expertengruppe als Maß definiert wurden. Die Fahrzeugwahl wurde so vorgenommen, dass die Spreizung möglichst groß ist. Die Ergebnisse wurden zusammengefasst und statistisch ausgewertet.

Anschließend erfolgte eine Korrelationsanalyse mittels derzeit zur Verfügung stehenden Analysemethoden von diversen Messtechnikherstellern. Die Korrelationsanalyse ergab, dass insgesamt vier Tools das höchste Bestimmtheitsmaß erzielen. Diese Tools ergaben mit einer entsprechenden Gewichtung ein Bestimmtheitsmaß von 0,95, was für die gegebene Aufgabe ein sehr zufriedenstellender Wert ist.

Diese Analyse wurde in ein firmeneigenes Tool von Mercedes-AMG eingebettet, das die exportierten Daten einliest und automatisch auswertet. Als Ergebnis wird eine Einzelnote sowie Details der einzelnen Analysen ausgegeben, falls beispielsweise bei mehreren Varianten von Akustik-Maßnahmen das genaue Ergebnis von Interesse war.

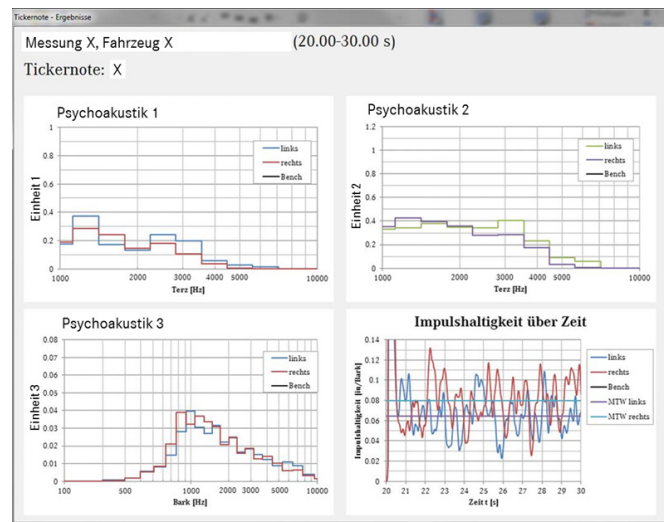


Abbildung 3: Screenshot des Tools „Tickernote“

Trotz eines hohen Anspruchs an die Geräuschqualität in allen Baureihen, bestehen zwischen einzelnen Fahrzeugklassen Unterschiede. Eine Bedingung war es, eine vom Fahrzeugtyp unabhängige Bewertung zu ermöglichen. Ein großer Vorteil ist dabei der Vergleich von verschiedenen Fahrzeugklassen untereinander. Durch mehrere Tests wurde das entwickelte Tool dafür als gut geeignet eingestuft. Die sensiblen Psychoakustik-Analysen haben bei gegebener Spreizung eine immer noch gute Auflösung, so dass die Note mit einer Dezimalstelle ergänzt werden konnte.

Literatur

- [1] Robert Bosch GmbH: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 26. Aufl., 2007
- [2] Steffens, Ch. et al.: Identifikation und objektive Bewertung impulshaltiger, störender Motorgeräuschkomponenten. Motor- und Aggregate-Akustik IV. expert verlag, 2012
- [3] Storm, R.: Kompendium Maschinenakustik Teil 1: Maschinenakustik – Grundlagen. SzM, TU Darmstadt, 2006