

# NVH-Aspekte von Zahnradgetrieben für PKW – Zielwertermittlung für Heulgeräusche

Jürgen Graf, Andreas Silies, Georg Eisele  
FEV GmbH, Aachen, E-Mail: graf\_j@fev.com

## Motivation

Wichtige Zielgrößen bei der Entwicklung von Zahnradgetrieben für PKW sind ein hoher Wirkungsgrad, niedriges Gewicht und niedrige Herstellungskosten. Außerdem sind Akustik und Schwingungen bedeutende Qualitätsmerkmale; ein Getriebe soll möglichst unbemerkt seine Arbeit tun. Diese Vorgaben stellen an die Konstruktion teilweise gegensätzliche Anforderungen. Vom Getriebehersteller werden NVH-Kriterien angestrebt, die in den verschiedenen Entwicklungsphasen auf Komponentenebene abgeprüft werden können. Den Fahrzeughersteller interessiert vor allem die Wahrnehmbarkeit von Getriebegeräuschen im Fahrzeuginnen. Am Beispiel des Getriebeheulens soll für Luft- und Körperschall betrachtet werden, wie Zulieferer und Fahrzeughersteller bei der Festlegung von Zielwerten für ein neues Getriebe eine Einigung finden können.

## Einleitung

Das Geräusch- und Schwingungsverhalten eines Automobils ist ein wichtiges Produktmerkmal. Ein angenehmes Klangbild und niedrige spürbare Vibrationen steigern den Komfort und sorgen für eine hohe Qualitätsanmutung. Ein niedriges Geräuschniveau reduziert den durch Lärmbelastung verursachten Stress und begünstigt die Wahrnehmung von akustischen Signalen des umgebenden Verkehrsgeschehens.

Methoden und Maßnahmen zur Verbesserung des NVH-Verhaltens (NVH für „Noise, Vibration, Harshness“) von PKW sind weitreichend bekannt. Allerdings besteht immer ein Zielkonflikt zwischen wahrnehmbarem Nutzen einerseits und zusätzlichen Aufwänden bzgl. Kosten, Bauraum und Gewicht (Kraftstoffverbrauch) andererseits (Abb. 1).

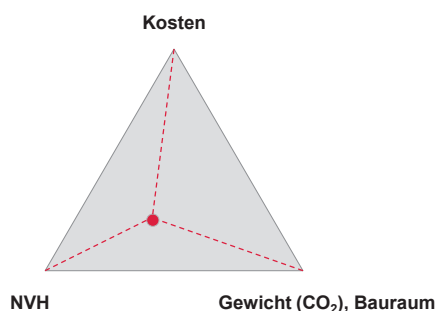


Abbildung 1: Typischer Zielkonflikt

Diese Kriterien sorgfältig abzuwägen, so dass am Ende ein konkurrenzfähiges Gesamtprodukt auf den Markt gebracht werden kann, ist eine Herausforderung, die sich mit der Entwicklung jedes neuen Fahrzeugs wiederkehrend stellt. Dafür sind genaue Kenntnisse über das Zusammenwirken von technischen Teilsystemen des Fahrzeugs nötig. Hieraus

können Grenzwerte für das NVH-Verhalten dieser Teilsysteme abgeleitet werden, die in allen Entwicklungsphasen als Gütekriterium dienen können. Im vorliegenden Text wird der Prozess der Zielwertfestlegung für tonale Geräusche von Zahnradgetrieben in PKW dargestellt.

PKW-Getriebe werden häufig von spezialisierten Zulieferern entwickelt. Hierbei wird entweder nur die Entwicklungsdienstleistung oder aber das fertige Getriebe als Massenprodukt für einen vereinbarten Stückpreis an die Fahrzeughersteller verkauft. Hiervon abhängig können die einzelnen Aspekte des o.g. Interessenkonflikts bei unterschiedlichen Firmen liegen. Dies unterstreicht den Bedarf klar formulierter und gut überprüfbarer Entwicklungsziele.

## Zahnradgetriebe

Die wichtigste Aufgabe eines Getriebes ist die Energieübertragung, zumeist bei gleichzeitiger Wandlung von Kräften und Wegen bzw. Momenten und Drehzahlen. Eine weitere notwendige Funktion ist häufig die Drehrichtungsumkehr. Im Fall von Getrieben für PKW mit Verbrennungsmotor muss das vom Motor bereitgestellte Leistungsangebot jederzeit bestmöglich an die Anforderungen der jeweiligen Fahrsituation angepasst werden. Diese Aufgaben müssen zuverlässig erfüllt werden bei möglichst hohem Wirkungsgrad, kostengünstiger Fertigung sowie kleiner, leichter und langlebiger Bauweise [1] [2]. Durch die zeitlich veränderlichen Kräfte, die in einem Getriebe wirken, entstehen Vibrationen und Geräusche, die von der Gehäuseoberfläche als sogenannter Luftschall abgestrahlt oder als Körperschall in benachbarte Strukturen eingeleitet werden. Typische Phänomene sind Rasseln und Klappern der Zahnräder, Kratz-, Schleif- und Klackgeräusche der Synchronisierung sowie Heul- und Pfeifgeräusche der aufeinander abwälzenden Zahnflanken. Die Insassen des Fahrzeugs sollen hiervon möglichst wenig wahrnehmen, da Getriebegeräusche in der Regel als unangenehm und lästig empfunden werden. Getriebegeräusche sind zwar leiser als die des Verbrennungsmotors, aber durch ihren impulshaften oder tonalen Charakter besonders auffällig für die menschliche Wahrnehmung [3].

## Getriebeheulen

Von den verschiedenen Getriebearten, die in PKW Verwendung finden, arbeitet die große Mehrzahl mit Zahnrädern. Die periodisch veränderliche Belastung der im Eingriff befindlichen Zähne verursacht entsprechende Reaktionskräfte in den Lagern und damit letztendlich im Getriebegehäuse. Neben dem Zahneingriffstoß ist es die sich kontinuierlich verändernde Steifigkeit zweier aufeinander abwälzender Zähne, die für periodische Wechselkräfte bzw. -momente sorgt. Während der Kontaktpunkt auf dem antriebs-

benden Rad vom Zahnfuß zum -kopf läuft, ist es auf dem getriebenen Rad umgekehrt; dementsprechend verformen sich die Zähne geringfügig mit dem Drehwinkel, was zu Gleichlaufschwankungen der Drehbewegung führt. Die Grundfrequenz dieser wiederkehrenden Ereignisse wird bestimmt durch Zähnezahl und Wellendrehzahl. Weil der Zeitverlauf nicht sinusförmig ist, entstehen auch Harmonische Oberschwingungen. Das entstehende Geräusch wird entsprechend der Tonhöhe als Getriebeheulen, -singen oder -pfeifen bezeichnet, seine Entstehungsweise ist aber stets gleich. Eine Darstellung als sog. Motorordnung, also als Vielfache der Eingangswellendrehzahl, ist praktikabel.

Konstruktive Maßnahmen, welche die periodischen Wechselkräfte reduzieren, verringern die Neigung zum Getriebeheulen. Ein wichtiger Parameter ist z.B. die Überdeckung, das ist die Anzahl Zähne, die gleichzeitig im Eingriff ist. Sie sollte möglichst groß sein. Hieraus folgt ein wesentlicher Vorteil der Schrägverzahnung gegenüber der Geradverzahnung. Weitere Einflussmöglichkeiten bieten Form und Oberflächenstruktur der Zähne, die Biegesteifigkeit der Wellen und die Strukturoptimierung des Gehäuses. [4]

### Prüfstandversuch

Um das NVH-Verhalten eines neuen Getriebes möglichst früh zu überprüfen, sind neben gewissen Simulationsmethoden vor allem Testläufe von Prototypen auf einem Getriebeprüfstand aufschlussreich. Hier können mit Hilfe leistungsfähiger E-Maschinen die zukünftigen Betriebszustände mit sehr guter Reproduzierbarkeit nachgestellt werden. Vibrationsmessungen mit Beschleunigungssensoren an geeigneten Stellen auf dem Gehäuse liefern erste wertvolle Erkenntnisse. Bei der Bewertung der Messergebnisse muss ggf. berücksichtigt werden, dass die Befestigung des Getriebes auf dem Prüfstand von der im Fahrzeug abweicht.



Abbildung 2: Getriebeprüfstand

Modifikationen wie z.B. Variationen der Verzahnungsgeometrie lassen sich mit relativ geringem Aufwand untersuchen. Die Erfassung des abgestrahlten Luftschalls ist häufig durch Störgeräusche des Prüfstandbetriebs beeinträchtigt und erfordert dann aufwändige Zusatzmaßnahmen. Ersatzweise kann die Schallabstrahlung über die Messung der Oberflächenschnelle an hinreichend vielen Punkten abge-

schätzt werden. Abb. 2 zeigt einen Getriebeprüfstand mit zwangsbelüfteten E-Maschinen.

### Fahrzeugversuch

Getriebeversuche im Fahrzeug sind in der Regel erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich, erlauben dann aber ein Urteil über die Geräuschentwicklung im Fahrzeuginnenraum unter alltagsnahen Bedingungen. Häufig ist die Verfügbarkeit von Prototypenfahrzeugen stark begrenzt, so dass in Konkurrenz zu anderen technischen Disziplinen nur wenig Zeit für Akustikuntersuchungen eingeräumt werden kann. Weitere Einschränkungen können im Reifegrad der Steuersoftware oder des Fahrzeugaufbaus (z.B. Abdichtung) liegen.

### Zielwerte

Zur umfassenden Untersuchung eines Getriebes hinsichtlich tonaler Geräusche müssen alle in Frage kommenden Betriebspunkte berücksichtigt werden, also Zug- und Schubtrieb bei verschiedenen Drehzahlen und Lastmomenten. Ferner sind die verschiedenen Ausbreitungspfade vom Ort der Anregung hin zum Fahrerohr zu betrachten. Insbesondere darf der als Luftschall übertragene Geräuschanteil im höheren Frequenzbereich, etwa oberhalb 1000 Hz, nicht vernachlässigt werden, da dort einerseits die elastischen Aggregatlager für sehr gute Dämpfung der Körperschallanteile sorgen und andererseits die maskierende Wirkung anderer Geräuschquellen, wie z.B. eines Verbrennungsmotors, deutlich geringer ist als im unteren Frequenzbereich. Die Festlegung von Grenzwerten für zulässiges Getriebeheulen muss diese Aspekte berücksichtigen.

Vom Getriebehersteller werden NVH-Kriterien angestrebt, die in den verschiedenen Entwicklungsphasen auf Komponentenebene abgeprüft werden können, zum Beispiel auf einem Getriebeprüfstand. Den Fahrzeughersteller interessiert vor allem die Wahrnehmbarkeitsschwelle von Getriebegeräuschen im Fahrzeuginnenraum. Hierfür sind Fahrzeugeigenschaften wie Aggregatlagerung und Schallschutzpaket aber auch maskierende Geräusche von Motor und Reifen bedeutsam. Daher sollte die Methode zur Überprüfung der Zielwerte idealerweise sowohl auf dem Prüfstand als auch im Fahrzeug angewendet werden können. Außerdem sollte sie zeitsparend und robust sein.

Einige dieser Forderungen können mit Hilfe von Beschleunigungsmessungen auf dem Getriebegehäuse erfüllt werden. Zur objektiven Beschreibung der Vibrationen können entweder die gemessene Beschleunigung selbst, oder nach numerischer Integration auch Schnelle oder Auslenkung herangezogen werden. Jede dieser Darstellungsarten hat ihre Vorzüge. Die Beschleunigung entspricht der physikalisch gemessenen Größe; ihre Betrachtung erfordert keine Umrechnung und ist somit sehr einfach möglich. Die Schnelle ist interessant aufgrund ihres mathematischen Zusammenhangs mit der Schallabstrahlung schwingender Oberflächen. Schließlich werden die Übertragungseigenschaften von Elastomerlagern häufig anhand der Auslenkung beschrieben. Dies ist im Hinblick auf die Körperschalleitung in die Fahrzeugkarosserie vorteilhaft.

Den vom Getriebe abgestrahlten Luftschall zu messen ist nicht einfach. Je nach Versuchsanordnung treten erhebliche Störgeräusche auf, z.B. von der Prüfstandtechnik oder vom Verbrennungsmotor im Fahrzeug. Günstige Bedingungen bietet ein Prüfstand in einem reflexionsfreien Raum, falls An- und Abtriebsperipherie geräuscharm arbeiten. Dann kann mit mehreren Mikrofonen nach einem Hüllflächenverfahren die Schallleistung ermittelt werden. Im Fahrzeug kann ebenfalls mit mehreren Mikrofonen rund um das Getriebegehäuse das Schallfeld erfasst werden. Allerdings ist hier mit erheblichen verfälschenden Einflüssen der benachbarten Berandungsflächen zu rechnen.

### Target-Cascading

Um das Zusammenspiel von Getriebe und Fahrzeug zu verstehen und daraus Rückschlüsse für die akustische Getriebeentwicklung zu ziehen, ist die Methodik der Transferpfadanalyse (TPA) gut geeignet. Die TPA beschreibt das Fahrzeuginnengeräusch als Überlagerung von Beiträgen vieler Teilschallquellen und zugehöriger Übertragungspfade und hat sich vielfach zur Analyse von Verbrennungsgeschwindigkeit oder auch Rollgeräusch bewährt. Bei FEV wird hierfür die Eigenentwicklung VINS (Vehicle Interior Noise Simulation) eingesetzt. [5]

Die Kenntnis darüber, wie groß die Beträge der verschiedenen Teilschallquellen zum Fahrzeuginnengeräusch sind, lässt sich nutzen, um ausgewogene NVH-Grenzwerte für diese Teilschallquellen festzulegen. Schallquellen mit stark dämpfenden Übertragungspfaden können höhere Anregungspegel zugestanden werden als den Quellen, die über sehr empfindliche, schwach dämpfende Übertragungspfade an den Fahrzeuginnenraum angekoppelt sind.

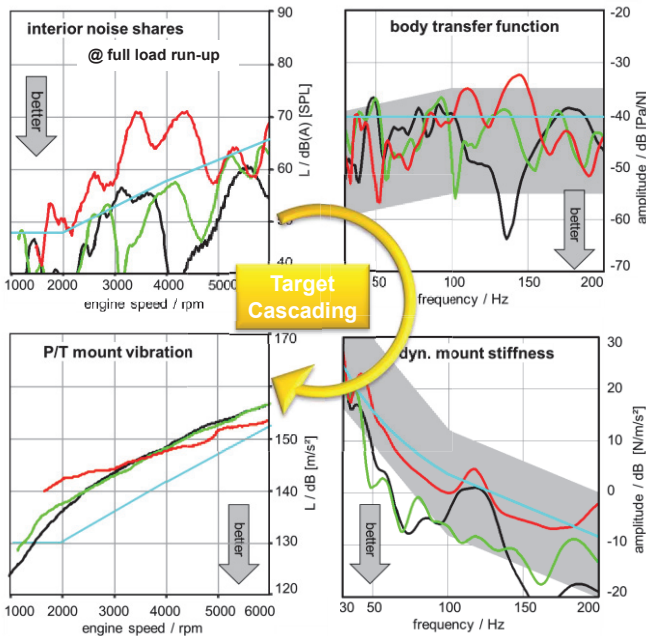


Abbildung 3: Zielwertermittlung mit inverser VINS

Diese systematische Verkettung von Zielwerten für Anregung, Übertragungsverhalten und Innengeräusch (-anteil) ist in Abb. 3 exemplarisch für die 2. Ordnung eines Verbrennungsmotors dargestellt [6].

Ist das Innengeräusch des betreffenden Fahrzeugs hinsichtlich Lautstärke und spektraler Zusammensetzung bekannt, so kann eine Grenze für die Wahrnehmbarkeit tonaler Geräuschanteile ermittelt werden. Dies kann entweder aufgrund theoretischer psychoakustischer Kenntnisse geschehen oder mithilfe von Hörversuchen mit durch Filterung veränderten Klangbeispielen. Nach einer einfachen aber oft zutreffenden Faustregel sind tonale Anteile im (breitbandigen) Gesamtgeräusch nicht störend, wenn sie mindestens 15 dB unterhalb des Gesamtpegels liegen.

Hat man eine Obergrenze für Getriebeheulen im Innengeräusch festgelegt, kann durch inverse Verknüpfung mit einer Transferfunktion auf den maximal zulässigen Anregungspegel für diesen Pfad, z.B. die Getriebelagerbeschleunigung, geschlossen werden. Auf diese Weise können Grenzwerte für alle Anregungen ermittelt und im Verlauf der Getriebeentwicklung abgeprüft werden. Der Vorteil individueller Grenzwerte je Teilschallquelle und Übertragungspfad liegt in der Vermeidung von Sicherheitsreserven, die bei einheitlichen Zielwerten nötig sind, um den kritischsten Fall abzusichern. Um diesen Vorteil zu nutzen, muss allerdings ein gewisser Aufwand betrieben werden. Eine Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist das Vorhandensein eines Zielfahrzeugs, an dem alle notwendigen Übertragungsfunktionen ermittelt werden können. Außerdem hängt die Festlegung der Wahrnehmbarkeitsschwelle entscheidend von der genauen Kenntnis über alle maskierenden Geräuschanteile (Motor, Wind, Reifen, etc.) ab. Steht noch kein Zielfahrzeug zur Ermittlung individueller Transferfunktionen zur Verfügung, können auch Ersatzfunktionen benutzt werden, z.B. als geglättete Mittelwerte von mehreren vergleichbaren Fahrzeugen. Hierdurch sinkt zwar die Vorhersagegenauigkeit und es müssen ggf. Sicherheitsfaktoren aufgeschlagen werden, aber die Näherungslösung berücksichtigt immer noch das Zusammenwirken von Luft- und Körperschall und die Ausbreitung über mehrere Pfade.

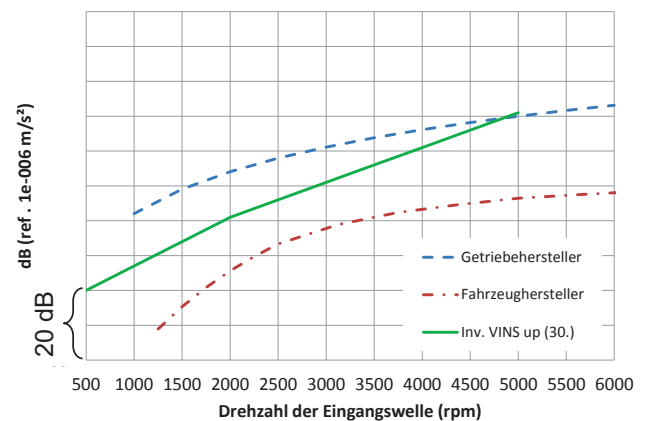


Abbildung 4: Zielkurve für das Getriebelager

Abb. 4 zeigt beispielhaft das Ergebnis eines vereinfachten Target-Cascadings für die zulässige Beschleunigung am Getriebelager eines Mittelklassefahrzeugs mit Verbrennungsmotor. Dargestellt ist die resultierende Kurve für die 30. Ordnung (durchgezogen) unter Verwendung vereinfachter Karosserie-Übertragungsfunktionen. Ebenfalls eingezeichnet sind zwei weitere Grenzkurven mit unterschied-

licher Herleitung, wie sie üblicherweise von einem Getriebehersteller (strichliert), oder von einem Fahrzeughersteller (strichpunktirt) verwendet werden. Der Abstand dieser beiden Kurven verdeutlicht die große Lücke, die bei einer Zusammenarbeit dieser beiden Firmen zu schließen wäre.

## Zusammenfassung

Zur Ermittlung optimaler NVH-Zielwerte für eine Getriebe-Fahrzeug-Kombination unter Berücksichtigung aller Interessengruppen ist ein systematisches Target-Cascading geeignet. Erforderlich sind hierfür genaue Kenntnisse des maskierenden Fahrzeuginnengeräuschs (Art des Antriebsaggregats, Betriebsmodi, etc.) und der Fahrzeugeigenschaften (Übertragungsfunktionen). Luftschall und Körperschall sollten berücksichtigt werden. Alle Aggregatlager müssen als mögliche Einleitungsstellen für Körperschall beachtet werden, z.B. bei einem Quereinbau neben dem Getriebelager besonders noch die Drehmomentstütze.

Einfachere Ansätze liefern schnellere und im Entwicklungsprozess manchmal ausreichende Ergebnisse. Solche Methoden benötigen aber große Sicherheitsreserven, wenn sie zur endgültigen Produktspezifikation führen sollen. Hier besteht erfahrungsgemäß das Risiko, dass die verschiedenen Interessenvertreter im Entwicklungsprozess zu keiner Einigung kommen und nicht das gesamtheitliche Optimum gefunden wird.

Die Verwendung von vereinfachten Transferfunktionen, z.B. als Mittelwerte für eine bestimmte Fahrzeugklasse, stellt einen Kompromiss dar, der mit dem methodischen Gedanken der Transferpfadanalyse zu generalisierten Erkenntnissen führt, aber geringeren Aufwand darstellt und keine individuellen Kenntnisse über das Zielfahrzeug benötigt.

## Literatur

- [1] Looman, J.: Zahnradgetriebe, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996 (Nachdruck 2009)
- [2] Naunheimer, H., Bertsche, B., Lechner, G.: Fahrzeuggetriebe, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [3] Genuit, K. (Hrsg.): Sound-Engineering im Automobilbereich, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- [4] Zeller, P. (Hrsg.): Handbuch Fahrzeugakustik, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009
- [5] Alt, N., Wiehagen, N., Schlitzer, M. W.: Interior Noise Simulation for Improved Vehicle Sound, SAE 2001-01-1539
- [6] Eisele, G., Angermaier, F., Genender, P., Wolff, K.: Systematisches Konzept zur Definition von akustischen Zielwerten für Fahrzeugsysteme und -komponenten, Aachen Acoustics Colloquium, 2011