

Akustische Untersuchungen im Gesamtsystem Verbrennungsmotor-Getriebe

Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. W. Gold, Dr.-Ing. R. Schelenz, Dipl.-Ing. J. Fechler

Institut Maschinenelemente und Maschinengestaltung IME, Aachen; Email: post@ime.rwth-aachen.de

Einleitung

Die getrennte akustische Optimierung an Einzelaggregaten wirkt sich im allgemeinen positiv auf das Gesamtgeräuschverhalten einer Anlage aus, die aus mehreren Einzelkomponenten zusammengesetzt ist. Zunehmend werden die Konstrukteure jedoch mit dem Phänomen konfrontiert, daß die als Einzelkomponenten getrennt entwickelten, optimierten und erprobten Baugruppen im Zusammenspiel unerwünschte und unvorhergesehene Geräusche verursachen. Bei der Entwicklung neuer, lärmarmere Produkte ist daher zu beachten, daß Anregung, Luftschall und Körperschall nicht unabhängige Größen der Einzelaggregate, sondern abhängig von deren Zusammenwirken im Gesamtsystem sind.

Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen sind ein Nutzfahrzeug-Diesel- sowie in PKW-Otto-Motor mit angeflanschem 6- bzw. 5-Gang-Handschaftgetriebe. Ziel der Untersuchungen ist die akustische Analyse des Verbundsystems Verbrennungsmotor-Getriebe sowie die Darstellung des akustischen Verhaltens mittels Simulation. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Interaktion der Komponenten. Für den gesamten Motor-Getriebe-Verbund werden daher die Elemente der maschinenakustischen Übertragungskette analysiert und rechnerisch abgebildet. Auf der Grundlage der Versuche im befeuerten Motorlauf auf einem Akustikprüfstand wird ein Simulationsmodell entwickelt, welches das akustische Verhalten des Gesamtaggregate angefangen bei den Anregungsmechanismen bis hin zum abgestrahlten Luftschall wiedergibt.

Experimentelle Untersuchungen

Das Gesamtgeräusch des Aggregates wird in das direkt abgestrahlte Motorgeräusch, das direkt abgestrahlte Getriebegeräusch, das vom Getriebe abgestrahlte motorinduzierte Geräusch und das vom Motor abgestrahlte getriebeinduzierte Geräusch unterschieden, d. h., daß sowohl Motor als auch Getriebe einen Anregungs- und einen Abstrahlungsmechanismus besitzen. Zur meßtechnischen Differenzierung der Geräuschanteile von Verbrennungsmotor und Getriebe erfolgen Luftschallmessungen am geeignet modifizierten Gesamtaggregate.

Der Vergleich der einzelnen Messungen zeigt, daß im vorliegenden Fall die Anregung durch das Getriebe von untergeordneter Bedeutung ist. Die höchsten Luftschallpegel werden durch die Geräuschanteile des direkten Motorgeräuschs und des motorinduzierten Getriebegeräuschs verursacht. Die vom Motor verursachte Anregung wird also zum einen durch den Motor direkt und zum anderen durch entsprechende Körperschallübertragung vom Getriebe abgestrahlt.

Die Interaktion zwischen Motor und Getriebe ist bei diesem Versuchsträger nicht dominant. Die Zahneingriffsordnungen der Getriebezahnpaarungen übertragen sich zwar über die Struktur des Motors und sind im Luftschallnahfeld des Motors nachweisbar, sind aber nicht pegelrelevant. Für eine Übertragung der Getriebe-gangordnungen auch über den inneren Körperschalleitweg sprechen die in der Nahfeldintensitätsmessung am Kurbelwellenrad gefundenen Zahneingriffsfrequenzen, welche ebenfalls nicht pegelrelevant sind. Eine Bewertung der einzelnen Seiten des Gesamtaggregate

zeigt, daß die Einspritzpumpen- und die Frontseite die dominanten Motorseiten darstellen, wobei das Getriebe auf der Oberseite deutlich zur Schallabstrahlung beiträgt. Ein signifikanter Einfluß der Gangwahl auf das Abstrahlverhalten des Gesamtaggregate konnte nicht festgestellt werden.

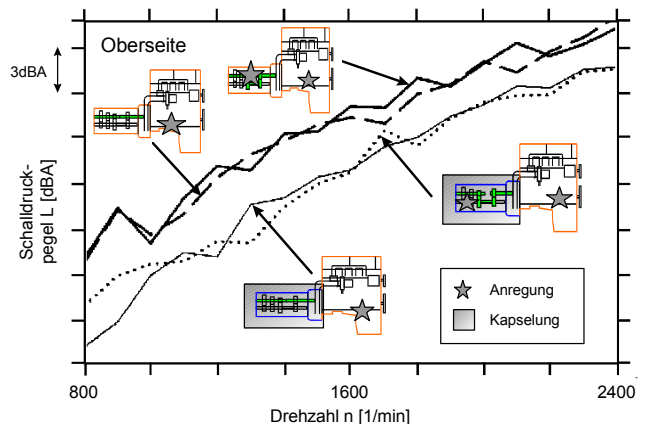


Abbildung 1: Direkte und induzierte Geräuschanteile

Rechnerische Untersuchungen

Berechnung der dynamischen Anregungskräfte

Maßgeblich zur Berechnung des Körperschallverhaltens sowie des abgestrahlten Luftschalls ist die Kenntnis der strukturanregenden inneren dynamischen Reaktionskräfte. Die Randbedingungen dieser Anregungsrechnungen, wie der zeitliche Verlauf des Einspritzdrucks oder des Abtriebsmoments, werden im Versuch ermittelt und verifiziert. Neben der direkten Berechnung der Anregungskräfte zur Bestimmung des Körperschalls liefert die Simulation außerdem Aussagen, inwieweit sich die meist nichtlinearen Anregungsmechanismen über die jeweiligen Systemgrenzen von Motor und Getriebe hinweg beeinflussen.

Besonderes Augenmerk liegt bei der Simulation des NKW Antriebes auf der Interaktion zwischen dem Steuerrädertrieb und den Getriebeerregungen über den Antriebsstrang. Die Berechnung des nichtlinearen Antriebsstrangs erfolgt über ein Drehschwingungsmodell mit dem FVA Simulationsprogramm DRESP. Das Modell des Antriebsstrangs umfaßt den Steuerrädertrieb mit Einspritzpumpe, Luftpresser, Zahnradölpumpe, den Verbrennungsmotor, die Schaltkupplung und das Getriebe inklusive der Losräder. Die Drehschwingungsrechnung erfaßt die periodisch veränderlichen Zahnsteifigkeiten der Getriebe- und Steuerräder, die periodischen Trägheiten des Kurbeltriebs und die Verzahnungsspiele. Als Anregungen werden bei der Simulation die zuvor gemessenen Gaskräfte berücksichtigt. Im einem weiteren Schritt der Anregungsberechnung werden aus den ermittelten Wellenmomenten die äquivalenten Lagerkräfte mit der FEM berechnet. In Abbildung 2 sind die berechneten Lagerkräfte für den PKW-Antrieb für ein Drehzahlband von 2000 bis 6000 min^{-1} für die Vorgelegewelle gezeigt.

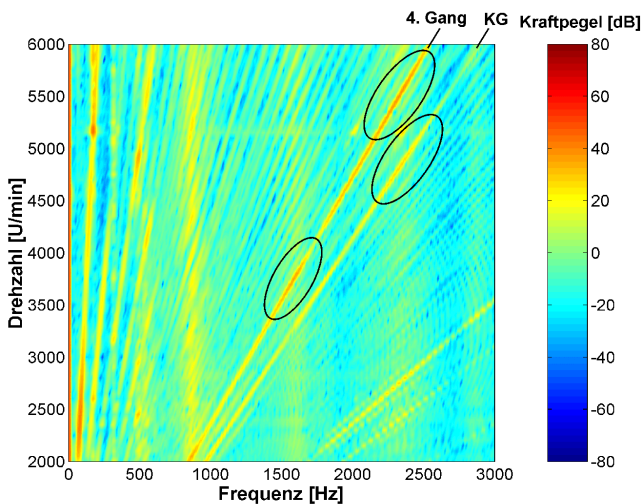


Abbildung 2: Berechnete radiale Lagerkraft der Vorgelegewelle

Die Auswertung der Anregungsberechnung zeigt, daß die Motoranregungen aus der Verbrennung und der Einspritzpumpendynamik für das Gesamtgeräusch des Versuchsträgers von entscheidender Bedeutung sind. Weiterhin läßt sich erkennen, daß eine Interaktion der Anregungsmechanismen von Verbrennungsmotor und Getriebe grundsätzlich vorhanden ist. Am deutlichsten ist hierbei der Einfluß der Gaskräfte und der dynamischen Trägheiten des Kurbeltriebs auf die Anregung des Getriebes.

Berechnung des Strukturübertragungsverhaltens

Grundlage für die Berechnung des Strukturübertragungsverhaltens bildet ein Finite-Elemente-Modell des gesamten Aggregats. Die Anregung des FE-Modells erfolgt durch Einleitung der zuvor berechneten Kraftspektren in die Hauptlager des Motorblocks und die Getriebewellenlager. Als Ergebnis der Berechnung erhält man die Strukturantwort in Form einer Oberflächenschnelleverteilung.

Durch Variation der Anregungen im Rechenmodell lassen sich die signifikanten Körperschallpfade zwischen den Bauteilen aufzeigen. Abbildung 3 zeigt dies beispielhaft für einen Motortragarm.

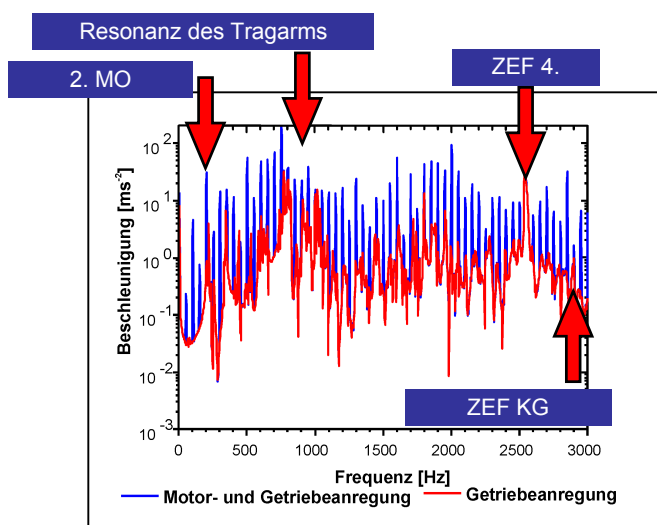


Abbildung 3: Übertragungsverhalten: Vergleich mit/ohne Getriebeanregung am Motortragarm (PKW)

Nach der Summation der Spektren der Oberflächenschnellequadrate des Aggregats erfolgt die Bestimmung des A-bewerteten Pegels.

Somit können die mit der Simulation ermittelten Oberflächengeschwindigkeiten gemessenen Nahfeldintensitäten gegenübergestellt werden. Der qualitative Vergleich zwischen Nahfeldintensitätsmessung und berechnetem Körperschall ergibt dabei eine gute Korrelation zwischen Rechnung und Messung.

Abschließend werden mit Hilfe der Simulationsmodelle Optimierungspotentiale an Einzelaggregaten und am Gesamtaggregate aufgezeigt. Die Rechnungen zeigen, daß am Einzelaggregate ermittelte Optimierungspotentiale sich im Spektrum des Gesamtaggregate ebenfalls positiv auswirken. Am Beispiel des Steuerräderdeckels konnte dies auch meßtechnisch verifiziert werden.

Berechnung der Schallabstrahlung

Abschluß der rechnerischen Untersuchungen bildet die Bestimmung des Luftschalls. Hier sind Berechnungen sowohl mit Hilfe der Boundary-Elemente-Methode (BEM) wie auch mit der Statistischen Energieanalyse (SEA) durchgeführt worden.

Die Boundary-Elemente-Methode benötigt lediglich ein Netz der Oberfläche der zu untersuchenden Struktur. Randbedingung für die Berechnung sind die mittels der FEM berechneten Oberflächengeschwindigkeiten. Die Berechnung des Luftschalls erfolgt im Frequenzbereich. Ergebnis der Simulation sind u. a. die Schalldruckverteilung des umgebenden Mediums. Wesentlicher Nachteil bei den durchgeführten Rechnungen sind die sehr hohen Rechenzeiten.

Demgegenüber können mit der Statistischen Energieanalyse relativ einfache Simulationsmodelle (Abbildung 4) zur Berechnung des Luftschalldruckes an einzelnen Mikrofonpositionen aufgebaut werden. Problematisch ist die Kenntnis der benötigten Kopplungs- und Dämpfungsverlustfaktoren. Mit den aufgebauten SEA Modellen lassen sich jedoch effektiv Variantenanalysen durchführen.

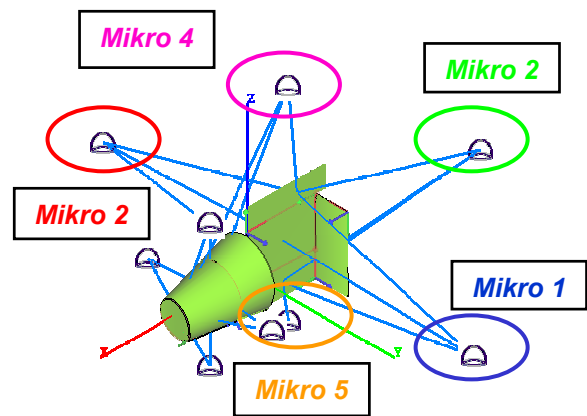


Abbildung 4: SEA Modell des Motor-Getriebe-Aggregats zur Berechnung des Luftschalldrucks an 5 Mikrofonpositionen

Zusammenfassung

Bei der meßtechnischen Untersuchung zeigte sich, daß das akustische Verhalten der verwendeten Versuchsträger deutlich vom Verbrennungsmotor geprägt ist. Dies betrifft sowohl die einzelnen quantitativen Geräuschanteile wie auch die Geräuschcharakteristik des Gesamtsystems. Entsprechend der maschinenakustischen Übertragungskette werden Simulationsmodelle zur Berechnung der Anregungen, des Körperschallübertragungsverhaltens und des abgestrahlten Luftschalls entwickelt. Die in der akustischen Berechnung betrachteten Mechanismen können im Simulationsmodell hinreichend genau abgebildet werden.