

Gezielte Abstimmung niederfrequenter Fahrzeug-Innengeräusche durch analytische Auslegung der dynamischen Steifigkeit des Kurbeltrieb-Systems

Matthias H. Schneider, Jakob Nehl, Hans-Peter Lahey
FEV Motorentechnik GmbH, Neuenhofstr. 181, 52078 Aachen

1. Analytische Auslegung des Antriebsaggregates

Die analytische Entwicklung soundrelevanter Bauteile des Antriebsaggregates erfordert zunächst die Entwicklung dynamisch bzgl. ihrer Eigenschwingungsamplituden ausgewogener Strukturteile des Laufzeugs wie der ruhenden Strukturen. Beim Laufzeug interessiert primär die Kurbelwelle, wirken hier doch die nach Kennzahlen abzuschätzenden Gaskräfte unmittelbar.

Mittels FEM Berechnung periodischer Schwingungen wird die Kurbelwelle hinsichtlich ihrer Biegesteifigkeiten und Torsionseigenschwingungen analysiert. Seitens der ruhenden Strukturen richtet sich das besondere Interesse auf die dynamische Elastizität des Lagerstuhls.

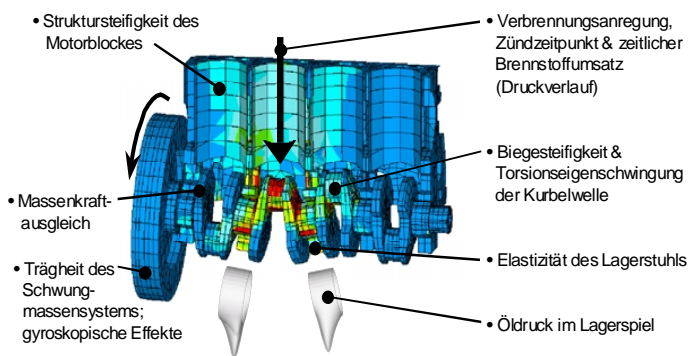


Bild 1: Kenngrößen der Motorakustik

Die Modellierung beweglicher Zusammenbauten, insbesondere der Kurbel- und der Nockenwellenlagerung, erfolgt mittels MKS-Berechnung stets im Zeitbereich. Hier sind es besonders die lästigen Schallkomponenten, die als Impulse oder Unstetigkeiten quantifiziert werden.

Zwischen Kurbelwelle und Lagerstuhl ermöglicht die Elastizität des Ölfilms signifikante Dämpfungen, erlaubt aber auch nichtlineare Impulse, insbesondere bei plötzlicher Verengung des Ölfilms. Das Berechnungsergebnis der 3-d Druckverteilung in den Lagerstellen liefert also die entscheidenden Eingangsparameter zur Transmissionsberechnung der ggfs. Impulsgeräusche abstrahlenden äußeren Aggregatestruktur.

Als Randbedingungen müssen die gyroskopischen und Trägheits-Effekte der rotierenden Komponenten berücksichtigt werden, insbesondere das Schwungmassensystem liefert, einseitig angekoppelt, massive Unsymmetrien in Motorlängsrichtung.

Innere Massenkräfte der oszillierenden Kolbengruppe werden mit Ausgleichsmassen, die an der Kurbelwelle mitrotieren, teils kompensiert. Dies ist relativ einfach zu berücksichtigen, nur der aus den intermittierenden Verbrennungen resultierende Anteil der Drehungleichförmigkeit verursacht Komplikationen.

Bekanntetechnik ist die rechnerische Prognose des Übertragungsverhaltens der ruhenden Strukturen wie Motorblock, Zylinderkopf, aber auch Deckel, Halter und Nebenaggregate. Hier ist zu beachten, daß die Ausgewogenheit der Amplituden bei der sukzessiven „Montage“ der festgefügtten Komponenten auch für den Zusammenbau gewährleistet bleibt.

Mit den Emissionsergebnissen des Antriebsaggregates für gerichtete Schallabstrahlung sowie für die dynamische Schwingungsanregung mindestens an allen Aggregatelagerungen wird eine Gewichtungsoftware gestartet. Im wesentlichen überlagert diese den Motorberechnungen nachgemessene Karosserieterminalwerte,

im Interesse einer aural gegenüberzustellenden Innengeräuschprognose für konkurrierende Bauteilentwicklungen.

Diese Methode wird sich für die Entscheidungsprozesse laufender Serienentwicklungen zu einem Standard entwickeln, ist so doch ermöglicht, neben den Aspekten der Kosten und des Bauwerks auch die der Qualität professionell zu vermitteln. Somit sollte es gelingen, den Entwicklungsanspruch der Akustik gegenüber der Projektleitung angemessen zu untermauern.

In der zeitkritischen Serien-Entwicklungsarbeit haben sich vorgenannte Methoden bewährt:

2. Entwicklungsbeispiel Kurbelwellen-Schwungradentkopplung

Zur Bekämpfung von Rauigkeitsproblemen bieten Maßnahmen an der Kurbelwelle das beste Potential. Im konkreten Falle einer Beanstandung eines Serienproduktes wurde der o.g. analytische Entwicklungsweg beschritten. Im Verbund dazu wurde die existierende Hardware experimentell erfaßt, insbesondere im Hinblick auf Eingabe- und Kontrollparameter der Berechnung. Die Modellierung der Motorstruktur konnte sich auf den Kurbeltrieb sowie das - hier nicht abgebildete - Kurbelgehäuse beschränken. Als wesentliche Komponente wurde die dynamische Druckverteilung in den Kurbelwellen-Hauptlagern 3-dimensional ermittelt.

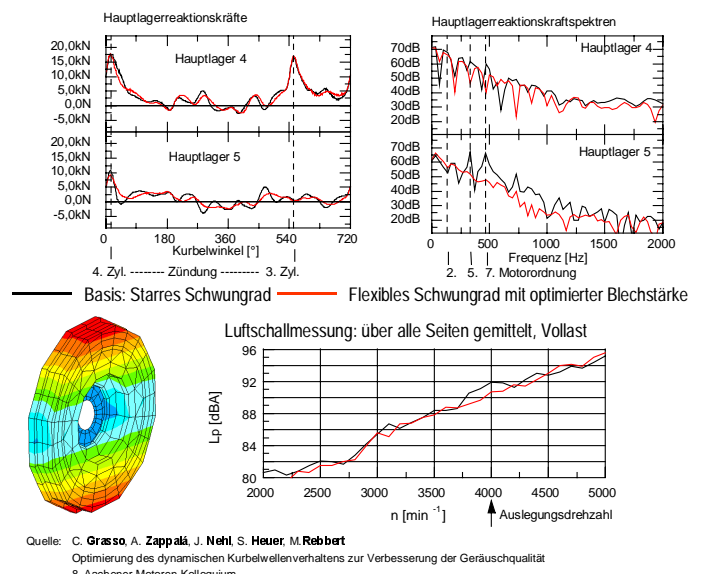


Bild 2: Dynamische Simulation incl. hydrodynamischen Wechselwirkungen

Die Ergebnisse der mittels MKS gekoppelten Berechnungen sind im Bild dargestellt, nämlich zunächst für den Betriebspunkt 4000 min^{-1} Vollast, als der zeitliche Verlauf ausgewählter Hauptlagerkräfte, daraus abgeleitet die entsprechenden Schmalbandspektren. Verglichen sind Berechnungsprognosen mit unterschiedlicher Steifigkeit der Schwungradnabe. Nach einigen rechnerischen Optimierungsschleifen werden insbesondere am schwungradseitigen Hauptlager 5 signifikante Verbesserungen der dynamischen Kraftanregung nachgewiesen. Luftschallmessungen am Antriebsaggregat liefern mit einer Vergleichsmäßigung der A-bewerteten Schalldruckpegel auf niedrigem Niveau einen ersten Erfolgsnachweis.

Detaillierte Meßerfahrung ist unverzichtbare Basis erfolgreicher Modellierung. FEV Motorentechnik setzt z.B. 4 Akustikprüfstände zum Ermitteln typischer Eingabeparameter ein und -zunehmend - um die Qualität rein rechnerisch vorabgestimmter Konstruktionen feinabzustimmen. Aufwendige Meßtechniken innerer und äußerer dynamischer Größen sind fallweise unverzichtbar.

Die motorinternen Bewegungen der Kurbelwelle werden heute routiniert mittels riemensseitiger 3-d Beschleunigungsmeßtechnik bzw. schwungradseitiger Taumelmeßtechnik quantifiziert.

Am Schwungrad werden außerdem - hier nicht abgebildet - überlagerte Drehschwingungen als Frequenzabweichungen eines geeigneten Meßzahnkranzes ausgewertet. Mit dem Erfahrungshintergrund unterschiedlichster Motorbauarten und Betriebszustände ermöglichen derartige Kenntnisse fundierte Abschätzungen von Eingabegrößen für Prognoserechnungen.

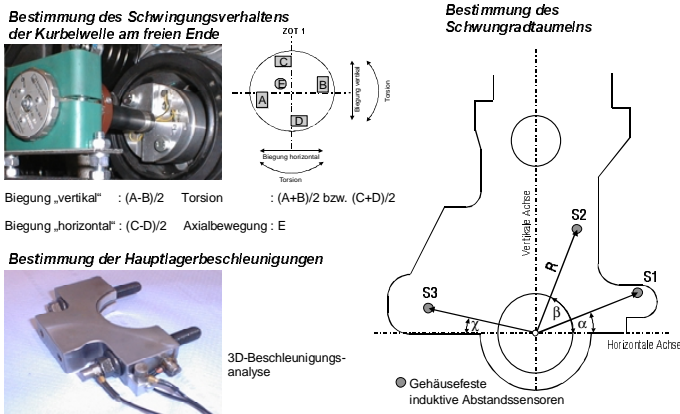


Bild 3: Meßtechnik am Kurbeltrieb

Zielgerichtete und daher zeiteffiziente analytische Entwicklung - hier einer ausreichend elastischen und dabei dauerfesten Schwungradnabe gegen Rauheitsprobleme - ermöglicht wirkungsvolle akustische Abhilfemaßnahmen. Das Bild zeigt das Kontrollresultat bzgl. der Pegelabsenkung der für die Rauheit entscheidenden 5. und 7. Motorordnung.

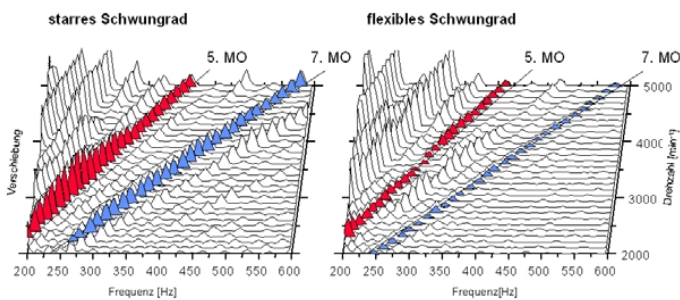


Bild 4: Problem der rauheitsrelevanten Ordnungspegel

Die akustische Relevanz des Schwungradtaumelns ist für den gesamten Drehzahlbereich nachweisbar und wesentlich von der Motorlast abhängig. Bandpaßgefiltert für den kritischen Bereich von 200 - 600 Hz wird im Meßergebnis der Motorgeräuschabstrahlung das Potential der Maßnahme anhand der Vollastkurve deutlich. Insbesondere konnte eine kritische Resonanz bei 3800 min⁻¹ eliminiert werden.

Rauheitsfenster 200-600 Hz, Schallabstrahlung des Motors gemittelt über 4 Seiten

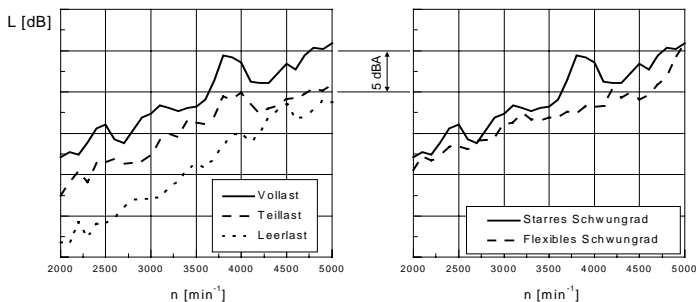


Bild 5: Motorsoundoptimierung, Motorakustik

Rauheitsprobleme im Frequenzbereich bis ca. 500 Hz werden typischerweise auch signifikant mittels Körperschall in die Karosserie eingeleitet. Daher sind die Meßergebnisse der Hauptlagerschwingungen sowohl für die Luftschallabstrahlung des Aggregates als auch für die Auflagerbelastung relevant. Wie

schon rechnerisch prognostiziert, werden am schwungradseitigen Hauptlager 5 die prägnantesten Fortschritte nachgewiesen.

Rauheitsfenster 200-600 Hz, Hauptlagerbeschleunigungen, Vollast, Raumvektor

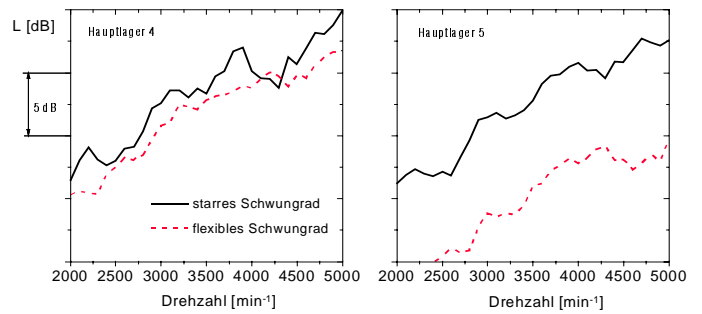


Bild 6: Analyse der Hauptlagerbeschleunigungen

Neben flexiblen Schwungradnaben, wie in diesem Entwicklungsbeispiel, werden in der Praxis viele verschiedene Konstruktionsmaßnahmen rechnerisch abgeschätzt, im Interesse frühzeitiger Definition aussichtsreicher Potentiale. Das Bild vergleicht die weniger wirksamen Aussichten anderer Kurbelwellenwerkstoffe (teurer in Werkstoff und Fertigungseinrichtung) sowie einer rauheitsoptimierten Lagerstuhlausbildung mit Brücke (ungünstiger in Gewicht und Package).

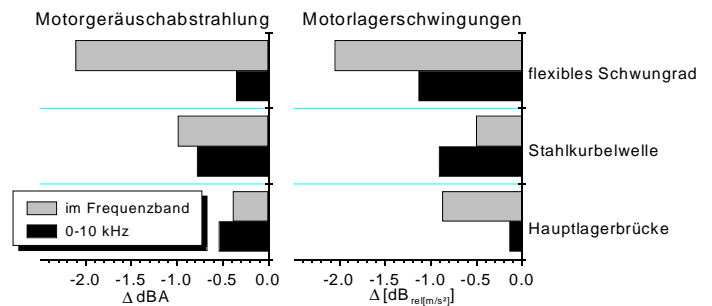


Bild 7: Beispiele alternativer Konstruktionsmaßnahmen

Trotz rechtzeitiger analytisch unterstützter Konzeption und Strukturdetailierung bleibt in der Serienanlaufentwicklung wohl auch langfristig die experimentelle Feinabstimmung. Doch auch hier kann die Berechnung unterstützen: Mit dem rechnerischen Verständnis des Ölfilms im Hauptlager kann auch das Lagerspiel voroptimiert und toleriert werden.

3. Zusammenfassung und Ausblick

- Die Qualität des Fahrzeugs wird wesentlich vom Geräusch- und Schwingungscharakter des Motor-Getriebe-Antriebsaggregats geprägt
- Soundmaßnahmen am Antriebsaggregat erfordern konsequente und lückenlose akustische Motorentwicklung vom Entwurfstadium an
- Alle antriebsakustischen Eigenschaften werden heute analytisch beherrscht - nur der Verbrennungsdruckverlauf muß nach Kennzahlen abgeschätzt werden
- Kennzahlen zur Karosserie erlauben die Prognose des Fahrzeugsounds durch Geräusche & Schwingungen des Antriebsaggregates für alle Soundkomponenten einzeln
- Schon ca. 4 Jahre vor Serienanlauf kann systematisch auf die motorische Soundqualität hingearbeitet werden; Maßnahmen zur Geräuschqualität sind in der Praxis berechenbar
- Enge und frühzeitige Abstimmung der Aggregate- und Fahrzeugentwickler reduziert drastisch Produkt- und Entwicklungskosten - bei verbesserter Soundqualität