

7 Untersuchung des Körperschallübertragungsverhaltens

Nach der Erarbeitung von Möglichkeiten, die Anregung der Motorstruktur durch den Verbrennungsprozeß zu reduzieren und der Untersuchung der Auswirkungen von Modifikationen der Struktur auf den Luft- und Körperschall, soll nun das Körperschallübertragungsverhalten näher betrachtet werden. Die aus dem Verbrennungsprozeß resultierenden hohen Drücke und Druckgradienten stellen beim direkteinspritzenden Dieselmotor im Frequenzbereich oberhalb 800 Hz die dominierende Anregung der Motorstruktur dar. In der Folge soll nun eine Methodik vorgestellt werden, die eine Bewertung des Übertragungsverhaltens der Struktur für diesen Frequenzbereich ermöglicht. Durch dieses Vorgehen wird erreicht, die Motorstruktur unabhängig von der Anregung während des Betriebs zu beurteilen. Eine Ermittlung der Übertragungsfunktionen im Motorbetrieb erlaubt es, die dynamischen Eigenschaften der Struktur des gesamten für den Luftschall relevanten Frequenzbereichs unter Betriebslast zu untersuchen.

Neben der Ermittlung der Übertragungsfunktionen kann durch Betrachtung der bei der Analyse ermittelten Kohärenz eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Anregung durch den Verbrennungsprozeß die dominierende Anregungsquelle ist oder ob weitere Anregungsmechanismen am Körperschall beteiligt sein können. Für die Ermittlung der Übertragungsfunktion werden der Zylinderdruckverlauf als Eingangssignal und Körperschallsignale auf der Motoroberfläche als Ausgangssignal verwendet. Infolge des Verbrennungsprozeß des betrachteten Zylinders erfährt die Motorstruktur eine periodische impulsartige Anregung. Die dadurch entstehende hochfrequente Schwingung der Motorstruktur klingt dabei weitgehend bis zur Zündung des nachfolgenden Zylinders ab. Für die Ermittlung der Übertragungsfunktion wird das Zeitsignal vor der Transformation in den Frequenzbereich mit einem Zeitfenster multipliziert (Abb. 7.1). Die Ermittlung der Übertragungsfunktionen sowie die Anwendung werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

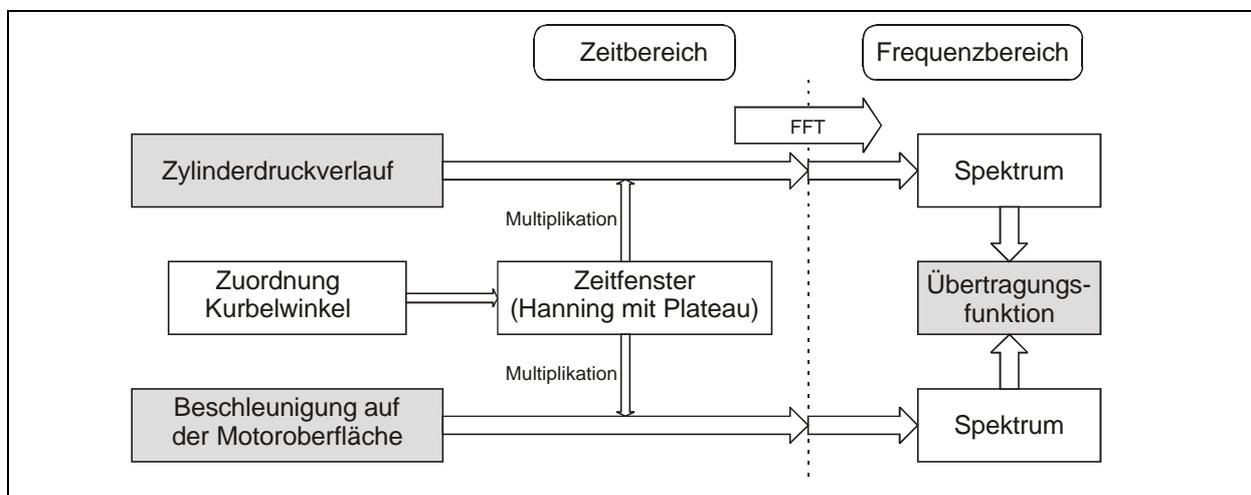


Abb. 7.1: Schematische Darstellung zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen

7.1 Ermittlung von Übertragungsfunktionen zur Charakterisierung der Struktur

Grundlage zur Bestimmung von Übertragungsfunktionen ist die Beschreibung aus Kapitel 3. Das dort beschriebene einfache Verfahren zur Bestimmung der Übertragungsfunktionen ohne Verwendung der Zeitfenstertechnik über ein oder mehrere komplette Arbeitsspiele führt zu nicht interpretierbaren Ergebnissen, da die Anregung durch die Verbrennung der anderen Zylinder bzw. anderer nicht als Eingangssignal definierter Quellen das eigentliche Nutzsignal überdecken. Aus diesem Grund wird die Übertragungsfunktion in einem definierten Kurbelwinkelfenster um den oberen Totpunkt der Zündung des zu betrachtenden Zylinders (ZOT) berechnet. Das Kurbelwinkelfenster wird dabei so gelegt, daß z.B. Öffnungs- oder Schließimpulse der Ventile ausgeblendet werden. Eine wichtige Voraussetzung für die Berechnung der Übertragungsfunktion ist die Wahl einer geeigneten Fensterfunktion (hier Hanning mit Plateau), die den Bereich im interessierenden Hochdruckteil des Zylinderdruckverlaufes nicht beeinflußt und den Bereich des Ladungswechsels ausblendet. Die Fensterung erfolgt bei Ein- und Ausgangssignal auf den gleichen Signalausschnitt. Durch die Verwendung des Kreuzleistungsspektrums sowie der Autoleistungsspektren werden inkohärente Störanteile weitgehend eliminiert. Aus den ausgewählten Signalausschnitten kann anschließend die Übertragungsfunktion bestimmt werden. Um trotz kurzem Zeitausschnitt eine ausreichend hohe Frequenzauflösung zu erreichen, kann die zu analysierende Signallänge durch Periodisierung des Einzelsignals und durch Betrachtung mehrerer Zyklen erhöht werden. Ein Beispiel der für eine Analyse verwendeten Signale bzw. Signalausschnitte und die daraus ermittelte Übertragungsfunktion wird in Abb. 7.2 dargestellt.

Neben der Ermittlung der komplexen Übertragungsfunktion kann die Berechnung der Kohärenz weitere Hinweise zum Verständnis der Signale bzw. des Systemverhaltens geben. Die Kohärenz ist wie die einzelnen Spektren und die Übertragungsfunktion frequenzabhängig. Sie wird eins bei vollständiger linearer Abhängigkeit von Eingangs- zu Ausgangssignal. Kleinere Werte bis hin zu Null ergeben sich bei überlagertem Rauschen bzw. durch Nichterfüllung der Grundvoraussetzungen zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen (kein lineares System, nicht erfaßte Eingangsgrößen). Bei Übertragung dieser allgemeinen Systembetrachtung auf eine Anwendung kann so die Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangssignal beschrieben werden. Der Nutzanteil (vgl. Abb. 3.3) im Körper- bzw. Luftschall entspricht dabei dem durch die Verbrennung hervorgerufenem Anteil der Körperschallschwingung bzw. des abgestrahlten Luftschalls. Der Störanteil beinhaltet unter anderem den durch mechanische Ursachen hervorgerufenen Anteil im Körper- und Luftschall.

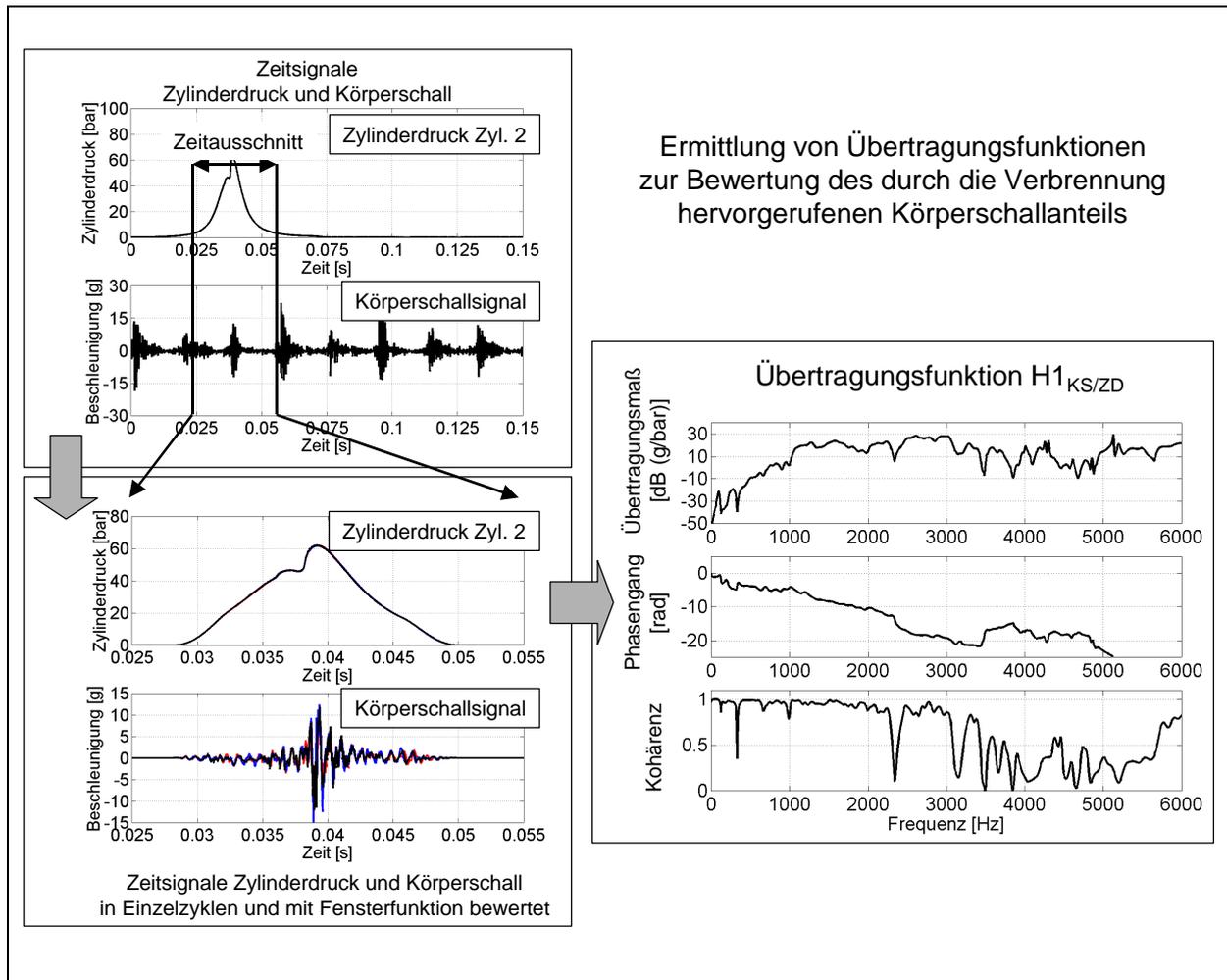


Abb. 7.2: Ermittlung von Übertragungsfunktionen

7.2 Bewertung der Körperschallübertragung

Nach der Erläuterung zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen werden nachfolgend verschiedene Anwendungsfälle zur Systembeschreibung mit Hilfe von Übertragungsfunktionen vorgestellt.

Ermittlung von Übertragungsfunktionen aus verschiedenen Betriebspunkten

Zur Charakterisierung einer Motorstruktur mit Hilfe von Übertragungsfunktionen muß der Verlauf der Übertragungsfunktion über die ermittelte Kohärenz auf ihre Plausibilität überprüft werden. In Abbildung 7.3 werden die aus einer Vielzahl von Betriebspunkten berechneten Übertragungsfunktionen (blau) sowie die gemittelte Übertragungsfunktion (rot) dargestellt. Zusätzlich zu den Übertragungsfunktionen wird der Phasengang und die Kohärenz der Einzelmessungen gezeigt. Eingangssignal im dargestellten Beispiel ist der Druckverlauf von Zylinder 2 und Ausgangssignal ein

Körperschallsignal auf der Zylinderkopfhaube. Anhand der geringen Streubreite sowie der hohen Kohärenz im Frequenzbereich von 400 Hz bis zu 3000 Hz läßt sich zeigen, daß die ermittelte Übertragungsfunktion in diesem Frequenzbereich weitestgehend plausibel ist. In diesem Frequenzbereich und den ausgewerteten Betriebszuständen wird das Körperschallsignal durch den Zylinderdruckverlauf von Zylinder 2 hervorgerufen. Eine Betrachtung des Verlaufes der Kohärenz zeigt jedoch, daß im Frequenzbereich um 2000 Hz sowie 2700 Hz bei einigen Drehzahl- und Lastpunkten Einbrüche bis zu Werten kleiner 0,5 zu beobachten sind, die darauf hindeuten, daß bei diesen Betriebspunkten im angegebenen Frequenzbereich das Ausgangssignal von einem Störsignal oder einer nicht erfaßten Anregungsquelle (z.B. Mechanik) überlagert wird.

Durch die Betrachtung einer aus einer Vielzahl von Drehzahl- und Lastpunkten gemittelten Übertragungsfunktion können Betriebspunkte des Motors identifiziert werden, bei denen das Ausgangssignal durch Signale überlagert wird, die nicht ursächlich der Verbrennung als Kraftanregung zuzuordnen sind. Bei der Ermittlung der Übertragungsfunktionen erweist es sich als vorteilhaft, die Verbrennungsparameter der einzelnen Betriebspunkte zu variieren, um eine ausreichende Anregung der Struktur in den interessierenden Frequenzbereichen zu erreichen und so die Qualität der Übertragungsfunktion zu verbessern.

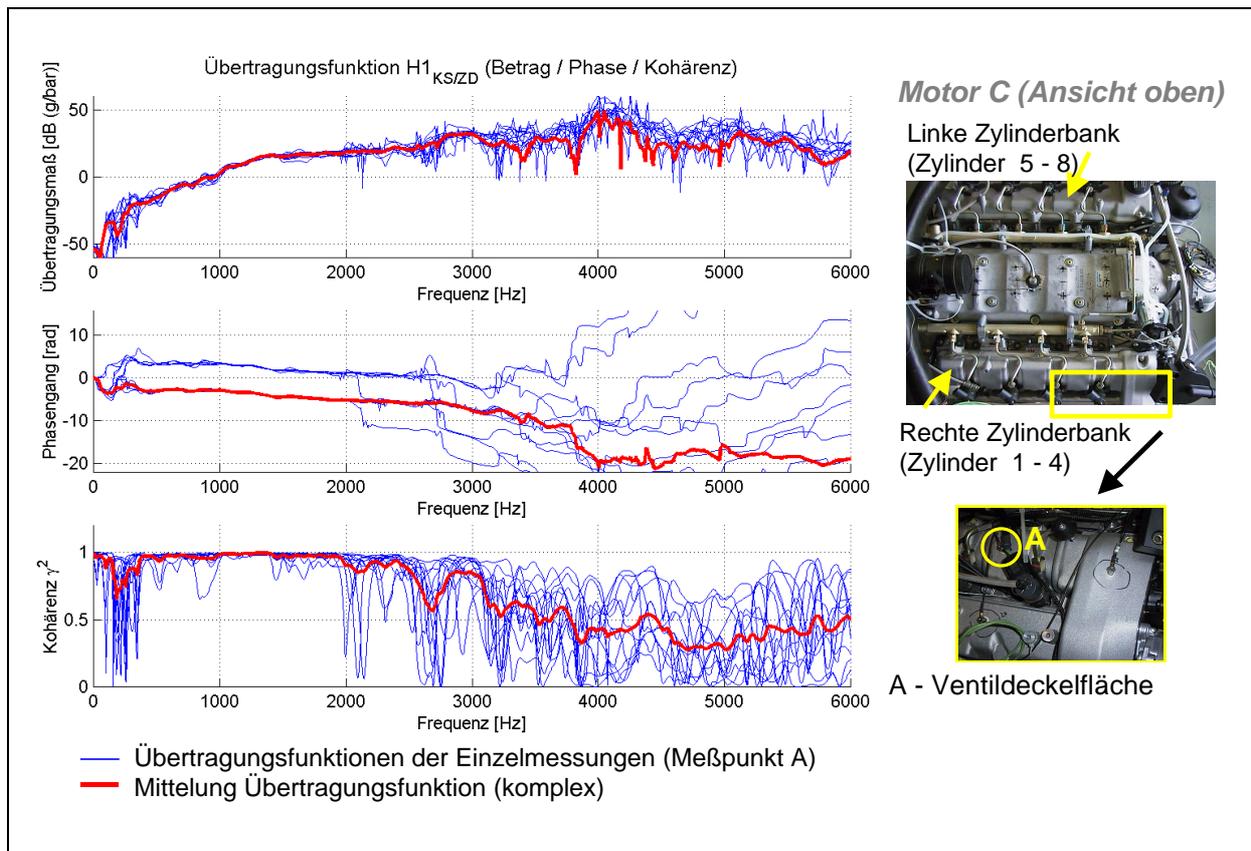


Abb. 7.3: Vergleich von Übertragungsfunktionen in verschiedenen Betriebspunkten

Vergleich von Übertragungsfunktionen verschiedener Meßstellen

Zur Beschreibung der Struktureigenschaften an verschiedenen Stellen des zu untersuchenden Motors können die Übertragungsfunktionen an beliebiger Stelle des Motors ermittelt werden. Durch diese Betrachtung kann man Bereiche der Oberflächen bzw. Bauteile identifizieren, die aufgrund der Anregung durch die Verbrennung hohe Körperschallpegel aufweisen. Dadurch wird es möglich, Schwachstellen der Struktur zu identifizieren und diese gezielt zu modifizieren. In Abb. 7.4 werden drei Meßstellen des Zylinderkopfes von Motor C miteinander verglichen. Dabei befinden sich die Meßstellen A und B auf der Zylinderkopfhaube und die Meßstelle C an einer sehr steifen Stelle des Zylinderkopfes.

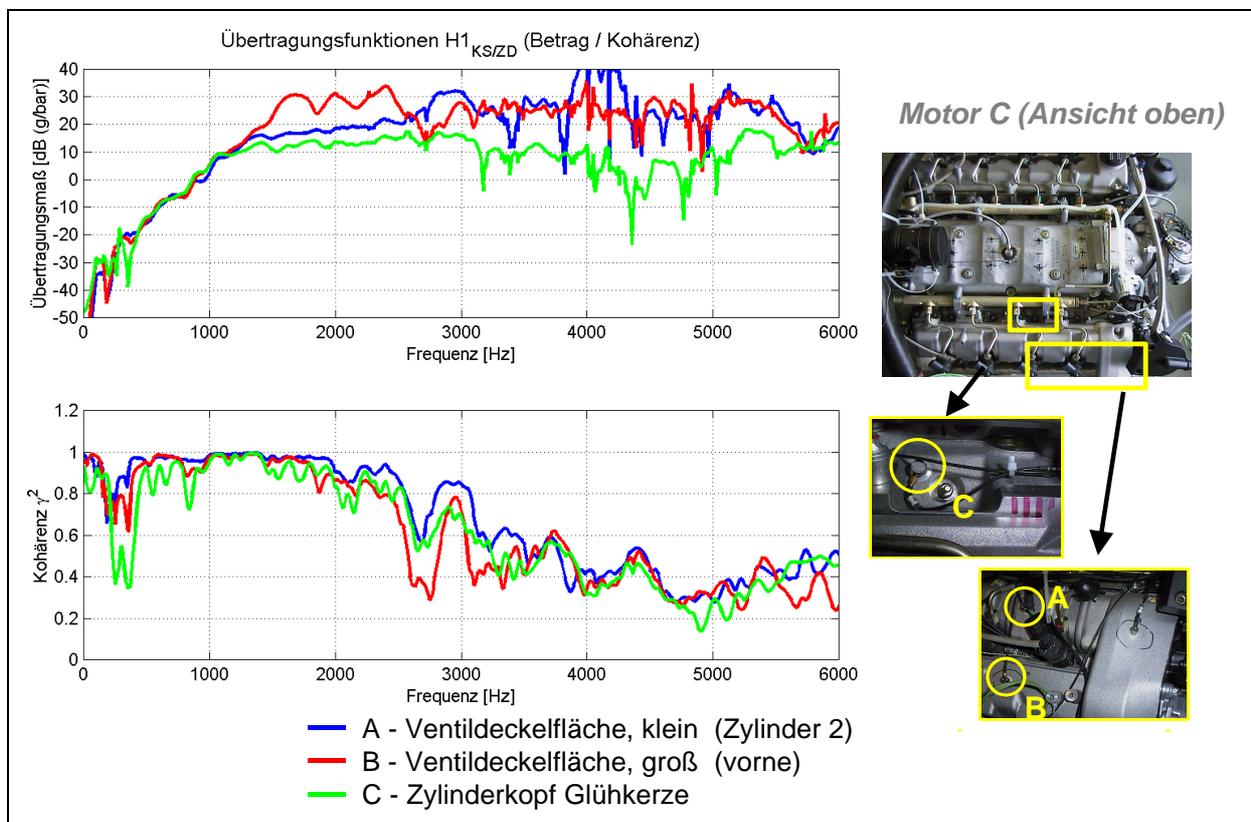


Abb. 7.4: Vergleich von Übertragungsfunktionen verschiedener Meßstellen

Der Vergleich der Verläufe der Übertragungsfunktion zeigt, daß die Meßstelle B den höchsten Pegelverlauf der Übertragungsfunktion aufweist. Obwohl Meßstelle A sich ebenfalls auf der Zylinderkopfhaube befindet, weist diese aufgrund ihrer lokalen Gestaltung im Bereich der Meßstelle eine Differenz von bis zu 10 dB im Verlauf der Übertragungsfunktion zwischen 1,4 kHz und 2,5 kHz auf. Meßpunkt C zeigt, daß eine weitere Versteifung der Struktur zu einer Reduktion von nochmals 3 dB führt. Alle drei Meßstellen werden bis zu einem Frequenzbereich von ca. 3000 Hz von der

Anregung durch die Verbrennung dominiert. Aussagen oberhalb dieser Frequenz können aufgrund der schlechten Kohärenz mit Hilfe der Übertragungsfunktion nicht getroffen werden.

Das angegebene Beispiel zeigt, daß es mit Hilfe der ermittelten Übertragungsfunktionen möglich ist, einzelne Teile der Struktur zu identifizieren, bei denen eine Modifikation der Struktur eine effektive Pegelreduktion bewirken kann.

Übertragungsfunktion bei vergleichbarem Körperschalleitweg

Zum Vergleich verschiedener Übertragungswege und zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Meßverfahrens werden anschließend die Übertragungsfunktionen mehrerer Meßstellen mit vergleichbarem Übertragungsverhalten vorgestellt. Dabei wird die Körperschallübertragung der einzelnen Zylinderdrücke zu Meßstellen in der Nähe der Zylinder am Zylinderkopf verglichen. Die ermittelten Übertragungsfunktionen zeigen, daß vergleichbare Übertragungswege zu ähnlichen Verläufen der Übertragungsfunktionen führen. Im betrachteten Fall zeigt auch der Phasenverlauf der Einzelfunktionen die hohe Ähnlichkeit des Übertragungsverhaltens. Dadurch kann dargelegt werden, daß es auf diese Weise möglich ist, die Übertragungswege, ausgehend vom betrachteten Zylinder, zu charakterisieren. Vergleichbare Übertragungswege führen dabei zu einem nahezu identischen Verlauf in Betrag und Phase der Übertragungsfunktion.

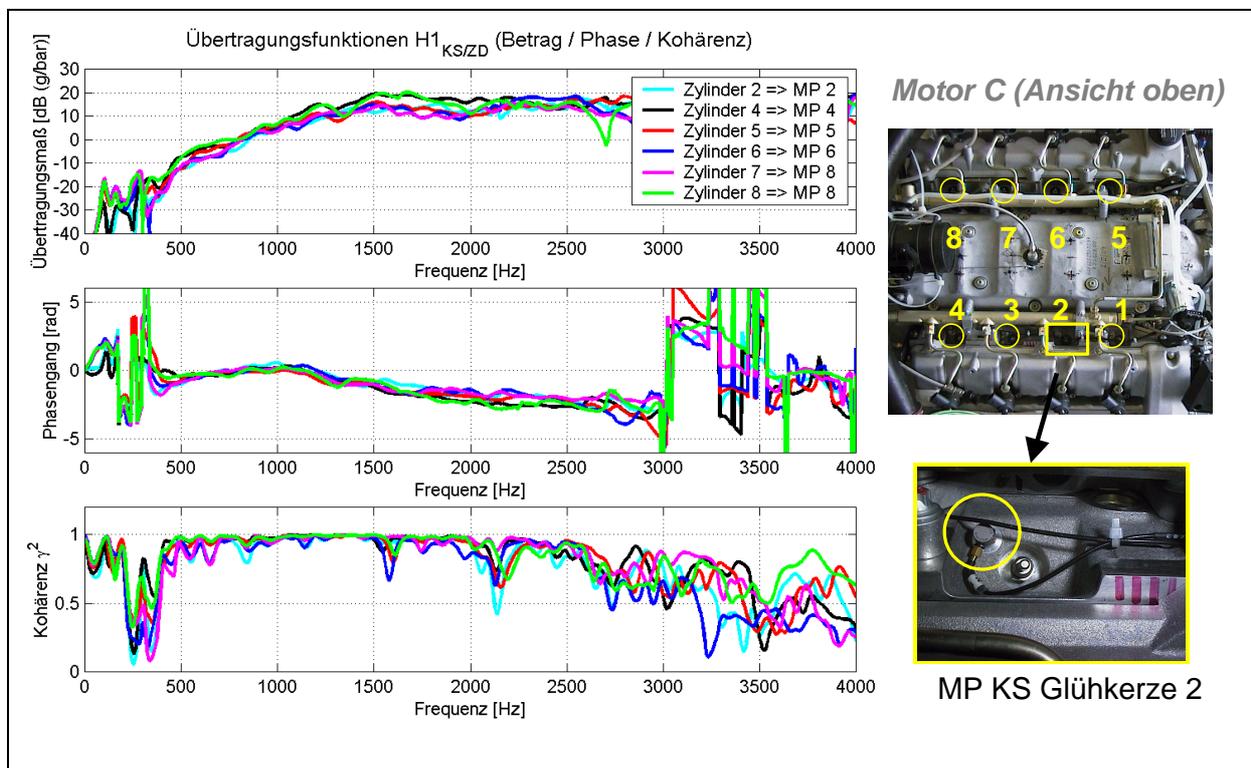


Abb. 7.5: Vergleich von Übertragungsfunktionen mit vergleichbarem Körperschalleitweg

Übertragungsverhalten verschiedener Zylinder zu einer Meßstelle

Die Charakterisierung des Übertragungsweges verschiedener Zylinder zu einer Meßstelle erlaubt die Beurteilung der Empfindlichkeit der Struktur auf die Anregung an verschiedenen Stellen der Motorstruktur. Von besonderem Interesse ist die Betrachtung des Übertragungsverhaltens ausgehend von den einzelnen Zylindern zum Körperschallsignal am Ende des Motorträgers am Motorlager. Dies ist vor dem Hintergrund der Körperschallweiterleitung über die Motorlager in die Karosserie und die Weiterleitung im Hinblick auf das Fahrzeuginnengeräusch von besonderer Bedeutung. Dabei sollte besonderes Interesse darauf gelegt werden, daß möglichst alle Zylinder ein ähnliches Übertragungsverhalten zu diesem Punkt aufweisen. Dadurch kann gewährleistet werden, daß von allen Zylindern eine möglichst gleichmäßige Körperschallanregung der Karosserie ausgeht. In Abb. 7.6 werden die Übertragungsfunktionen von drei Zylindern zum Meßpunkt des rechten Motorträgers dargestellt. Es ist im Verlauf der Übertragungsfunktion zu erkennen, daß die ermittelten Übertragungsfunktionen geringe Pegeldifferenzen aufweisen. Der Übertragungspfad wird bis ca. 3500 Hz von der Anregung durch die Verbrennung dominiert. Die Kohärenz zeigt bei allen drei betrachteten Übertragungsstrecken Einbrüche im Frequenzbereich unter 1000 Hz. Die in diesem Frequenzbereich zu beobachtende Nichtlinearität kann meist auf das dynamische Verhalten von Kurbelwelle, Kurbelwellenlagerung und Anbindung der Kurbelwellenlager an das Gehäuse zurückgeführt werden. Einbrüche der Kohärenz im Frequenzbereich um 2000 Hz bedürfen hingegen einer näheren Untersuchung des Systems zur Klärung der dort auftretenden Phänomene.

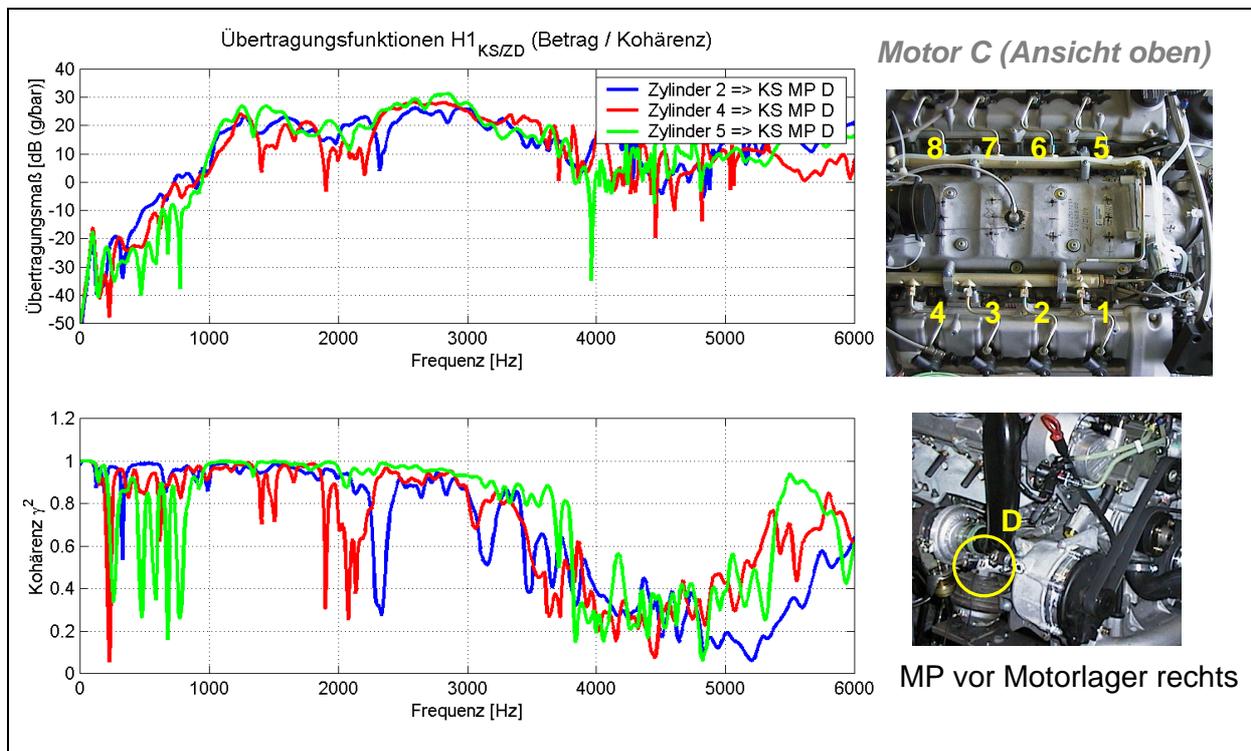


Abb. 7.6: Vergleich des Übertragungsverhaltens von allen Zylindern zu einem Meßpunkt

Bei der Beurteilung der Verläufe von Übertragungsfunktionen und dem ermittelten Verlauf der Kohärenz ist zu beachten, daß es zur Beurteilung der Struktureigenschaften von Vorteil ist, eine möglichst hohe Anregung durch den Verbrennungsprozeß zu erzielen. Damit wird es möglich, Schwachstellen der Struktur schnell und effizient zu identifizieren. Für eine Optimierung des Motorengeräusches mit bereits akustisch optimierter Verbrennung bietet die Ermittlung der Übertragungsfunktionen und die Betrachtung der Kohärenz die Möglichkeit, den durch die Verbrennung hervorgerufenen Körperschallanteil zu identifizieren. Ziel muß es dann sein, Maßnahmen zu erarbeiten, die Anregung durch den Verbrennungsprozeß gezielt in diesen Frequenzbereichen zu verbessern. Auf diese Weise kann eine effiziente und gezielte Optimierung des Motorgeräusches mit der Trennung von durch Verbrennung angeregtem Körperschall und Körperschallanteilen weiterer Anregungsmechanismen erzielt werden.

7.3 Bewertung einer Strukturmodifikation mittels Übertragungsfunktionen

Neben der Bestimmung des Übertragungsverhaltens von einzelnen Meßstellen kann das Verfahren auch zur Beurteilung und zum Vergleich von Strukturen und deren Körperschalleigenschaften herangezogen werden. Im folgenden werden die Übertragungseigenschaften der beiden Zylinderkopfvarianten (Motor A u. B) mit Hilfe der ermittelten Übertragungsfunktionen untersucht.

Dabei werden die Übertragungsfunktionen ausgehend von jeweils einem Zylinder zu den einzelnen Meßstellen auf der Zylinderkopfstruktur bei verschiedenen Drehzahl- und Lastpunkten ermittelt. Durch Mittelung der Übertragungsfunktionen der Meßstellen erhält man eine Aussage zum Übertragungsverhalten der Motorstruktur bei Anregung durch die einzelnen Zylinder (Abb. 7.7).

Die Auswertung bei beiden Motoren (A und B) zeigt, daß sich die gemittelten Übertragungsfunktionen der einzelnen Meßpunkte zu den Zylindern nur gering unterscheiden. Die Streubreite liegt in weiten Frequenzbereichen bei maximal 3 dB. Bei der Betrachtung der Kohärenz kann festgestellt werden, daß die ermittelte Kohärenz von Motor B unter der von Motor A liegt. Dies deutet darauf hin, daß der Anteil des Körperschalls, der durch die Verbrennung hervorgerufen wird, bei Variante B geringer ist und weitere Anregungsmechanismen vorhanden sein müssen.

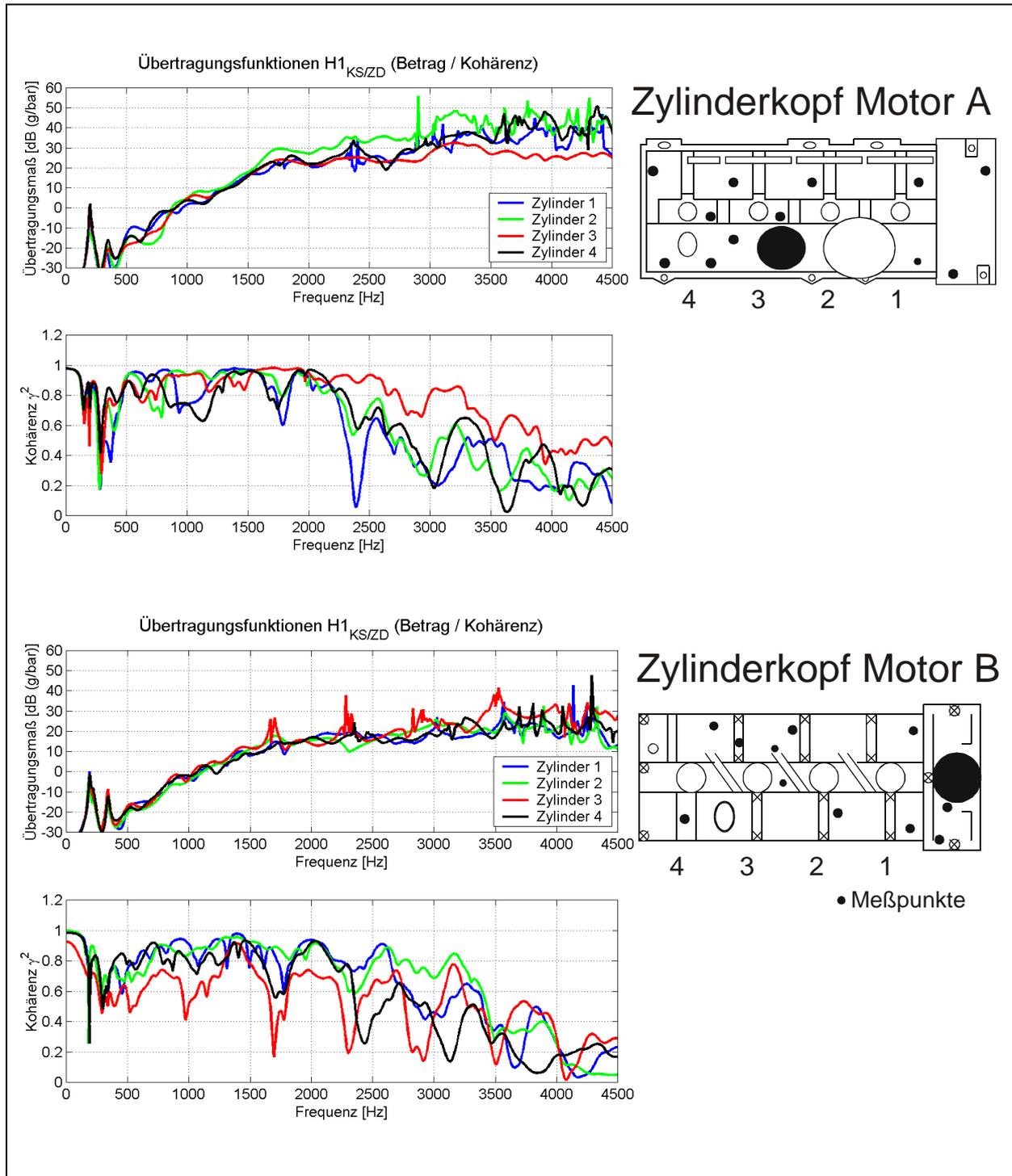


Abb. 7.7: Bewertung des Übertragungsverhaltens bei einer Strukturmodifikation

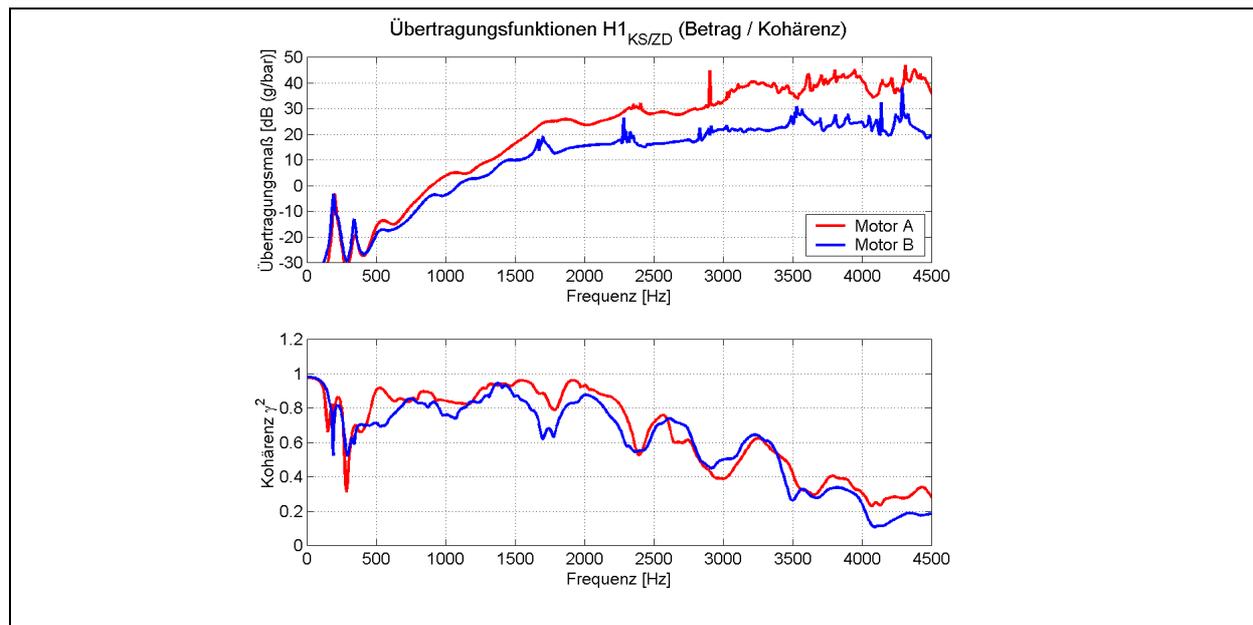


Abb. 7.8: Bewertung des Übertragungsverhaltens bei einer Strukturmodifikation (Gesamtbetrachtung)

Der Vergleich der gemittelten Übertragungsfunktionen aller Zylinder zu den Meßstellen beider Zylinderkopfvarianten zeigt, daß der Verlauf der Übertragungsfunktion von Variante B mit zunehmender Frequenz geringere Pegel aufweist (Abb. 7.8). Dies bedeutet, daß diese Variante bei Betrachtung des Körperschallübertragungsverhaltens und der Anregung durch den Verbrennungsprozeß zu einer Pegelreduktion bei gleicher Verbrennungsanregung führt. Damit können die bereits durch die Betriebsmessungen aufgezeigten Vorteile der Struktur mit Hilfe der ermittelten Übertragungsfunktionen bestätigt werden.