

## 6 Auswirkungen auf Körperschall und Luftschall bei Modifikation der Struktur

In diesem Kapitel soll der Einfluß einer Strukturmodifikation des Zylinderkopfes der Vierzylinder-Motoren untersucht werden. Neben den Möglichkeiten der Änderung der Kraftanregung des Motors durch Variation der Verbrennung wird dargestellt, in welcher Höhe und welchem Frequenzbereich das Körperschallübertragungsverhalten durch eine Modifikation der Struktur beeinflusst werden kann.

Bei einer Modifikation der Struktur mit dem Ziel einer verminderten Geräuschabstrahlung handelt es sich wie bei der Beeinflussung der Kraftanregung durch den Verbrennungsvorgang um eine primäre Maßnahme zur Geräuschminderung. Modifikationen der Motorstruktur sind bei einer Optimierung des Gesamtsystems dann notwendig, wenn das Spektrum der Kraftanregung bekannt ist und dort keine weitere Verbesserung zur Geräuschreduktion zu erzielen ist. Die Untersuchungen zum Einfluß der Struktur auf den Körper- und Luftschall werden an den beiden Vierzylinder-Motoren (Motor A u. B) durchgeführt.

Zunächst wird die modifizierte Struktur des Zylinderkopfes (Motor B) im Vergleich zum Ausgangszustand (Motor A) beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Körperschall- und Luftschallmessungen an diesen Motoren vorgestellt. Dabei wird neben dem abgestrahlten Luftschall auch die Abstrahlcharakteristik untersucht. Im Anschluß daran wird der Einfluß einer Variation der Verbrennungsparameter auf den Körper- und Luftschall aufgezeigt.

### 6.1 Strukturmodifikation

Die Strukturmodifikation soll den durch die Verbrennung eingeleiteten Körperschall auf der Strukturoberfläche reduzieren. Das dynamische Verhalten der Struktur kann dabei wirkungsvoll durch Maßnahmen an den Krafteinleitungspunkten und durch Modifikation der Übertragungscharakteristik und Oberflächengeometrie beeinflusst werden. Es bieten sich zwei grundsätzliche Möglichkeiten der Beeinflussung an. Zum einen kann eine Pegelreduktion durch eine Versteifung der Struktur und zum anderen durch eine Entkoppelung von körperschalleitenden oder abstrahlenden Komponenten erreicht werden. Eine Versteifung der Struktur kann z.B. durch Rippen, Verstrebungen oder Einspannungen sowie durch die Änderung der Materialstärke erreicht werden. Die Versteifung führt meist zu einer Verschiebung der Eigenfrequenzen der abstrahlenden Flächen zu höheren Frequenzen.

Bei der vorliegenden Strukturmodifikation (Motor B) ist im Vergleich zum Basiszustand (Motor A) eine sehr steife und kompakte Struktur des Zylinderkopfes realisiert worden. Diese Versteifung kann durch eine Bauweise der Zylinderkopfhaube mit integrierten Lagerstellen für die Nockenwellen erreicht werden. Jene werden damit als kraftführende Teile in den Gesamtverband des Kopfes

integriert. Dadurch wird die Zylinderkopfhaube deutlich steifer und mit geringerer Oberfläche ausgeführt als die der Basisvariante (Motor A). Die Lagerbrücken der modifizierten Variante (Motor B) dienen neben der Aufnahme der Lagerung der Nockenwellen gleichzeitig als Versteifung der Kopfstruktur in Querrichtung. Durch die Krümmung der Oberfläche (Bombierung) wird eine weitere Versteifung der Oberflächenstruktur erzielt. In Abb. 6.1 sind die Zylinderköpfe in demontiertem Zustand dargestellt.

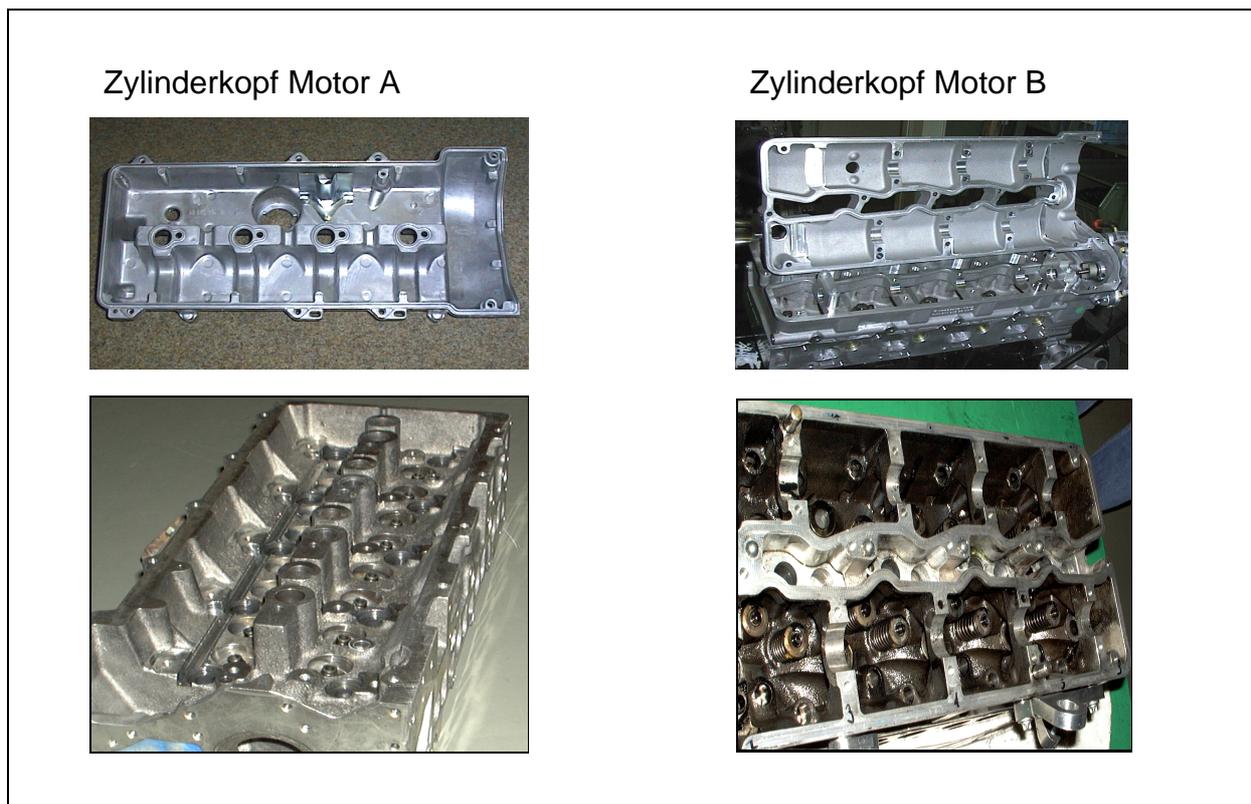


Abb. 6.1: Vergleich der Zylinderkopfstrukturen

## 6.2 Einfluß der Strukturmodifikation auf Körper- und Luftschall

Eine Bewertung der Strukturänderung im Hinblick auf ihre akustischen Auswirkungen (Körperschallübertragung und Luftschallabstrahlung) kann auf verschiedene Arten erfolgen. Dabei ist zwischen Betriebsmessungen und einer Identifikation der Struktureigenschaften bei Fremdanregung zu unterscheiden. Im folgenden werden zunächst die Auswirkungen der Strukturmodifikationen im Betrieb vorgestellt. Zudem wird noch ein Abgleich des Übertragungsverhaltens und eine Untersuchung der Abstrahlcharakteristik bei Fremdanregung durch einen Shaker vorgestellt.

Zur Untersuchung der Strukturmodifikation wird neben den Ergebnissen von Luftschallmessungen eine Untersuchungsmethode auf Basis von reinen Körperschallmessungen im Motorbetrieb

angewendet. Dadurch wird eine Bewertung der Modifikation von Teilstrukturen ermöglicht, die bei reinen Luftschallmessungen nur mit erhöhtem Aufwand (z.B. Intensitätsmessungen) möglich ist.

### 6.2.1 Einfluß der Strukturmodifikation auf den Körperschall

Zur Überprüfung der Körperschalleigenschaften der beiden Zylinderkopfstrukturen werden an beiden Zylinderköpfen Beschleunigungsaufnehmer montiert. Dabei werden 18 bzw. 20 Meßpunkte betrachtet. Diese werden auf dem Zylinderkopf so verteilt, daß eine Vielzahl von unterschiedlichen Struktureigenschaften (z.B.: steife und weiche Flächen) erfaßt werden. Durch die Verwendung einzelner Beschleunigungsaufnehmer kann das Körperschallverhalten und die Anregung der Struktur durch den Zylinderdruck zeitsynchron aufgezeichnet und ausgewertet werden. Dies kann bei der Auswertung von Körperschallsignalen bei Dieselmotoren mit hohem impulshaltigem Anteil durch die Verbrennung von Interesse sein. Nachteil dieses Vorgehens ist, daß man dafür Sorge tragen muß, daß man statistisch gesehen durch die Wahl der Meßpunkte eine Vielzahl verschiedener Flächen in die Messung einbezieht, um eine repräsentative Aussage der Struktureigenschaften durch eine Mittelung der Meßpunkte zu bekommen. Die Position der Beschleunigungsaufnehmer wird in Abbildung 6.2 dargestellt.

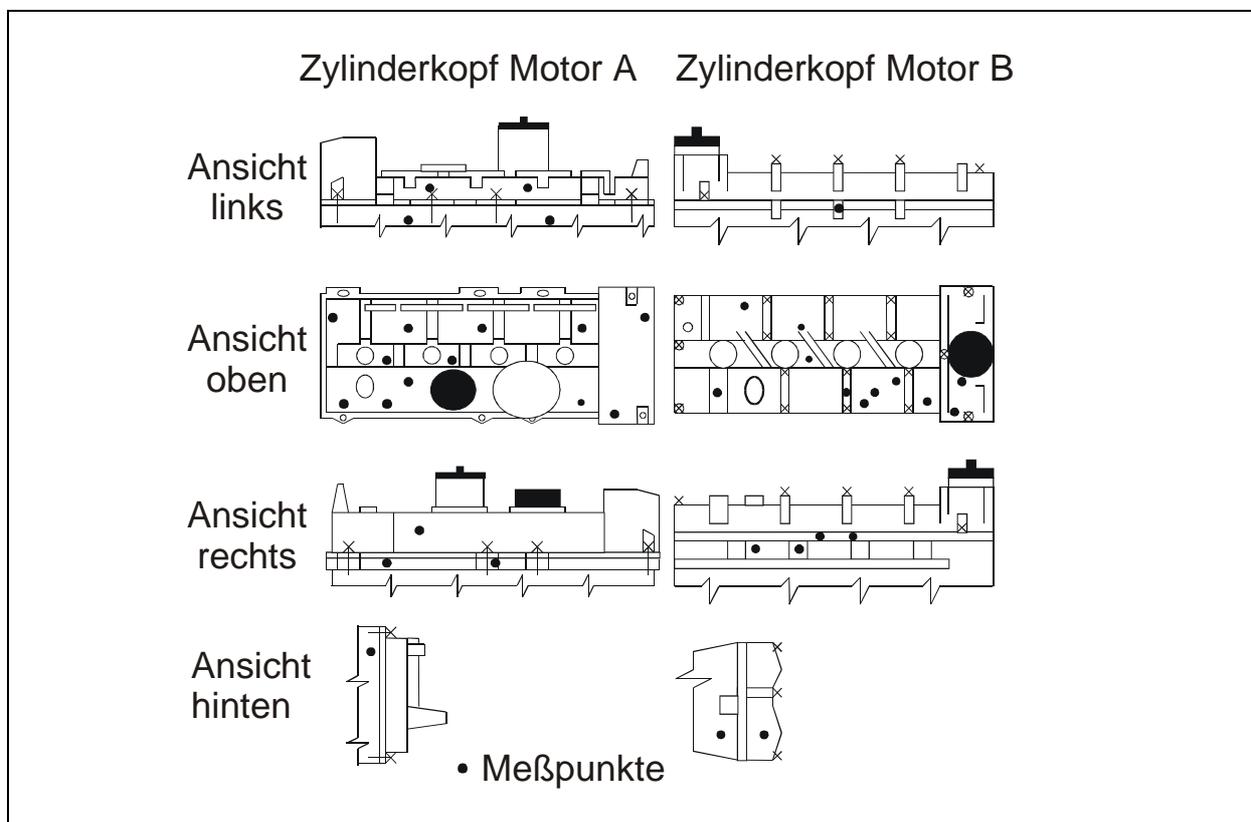


Abb. 6.2: Meßstellen Körperschalluntersuchung Zylinderkopf (Motor A und B)

Die Messungen werden auf einem Motorenprüfstand ohne reflexionsarme Verkleidung durchgeführt. Sie umfassen dabei Hochläufe unter Last sowie stationäre Betriebspunkte. Es werden zwei Drehzahl- und zwei Lastpunkte ausgewählt.

Meßpunkte:

Drehzahl  $n = 1500 \text{ 1/min}; 3000 \text{ 1/min}$

Drehmoment  $M_d = 100 \text{ Nm}; M_{d\max} = 250 \text{ bzw. } 300 \text{ Nm}$

Zur Auswertung werden die in stationären Betriebspunkten ermittelten Beschleunigungen in die Oberflächenschnelle umgerechnet und über die Anzahl der Meßpunkte mit einer Gewichtung des Flächenanteils energetisch gemittelt. Der Pegel wird anschließend noch mit der A-Bewertung gewichtet. Die Ergebnisse beider Zylinderköpfe werden dann vergleichend dargestellt. Zur Auswertung werden die Meßstellen zum einen in die Meßrichtung in Motorhochrichtung sowie in Längs- und Querrichtung aufgeteilt. Diese Aufteilung ist erforderlich, da sich der Aufbau der Zylinderköpfe in Querrichtung deutlich unterscheidet. So ist Zylinderkopf A an der Seitenwand sehr steif ausgeführt. Darauf wird zur Gewichtsreduktion und im Hinblick auf die integrierte Bauweise bei Zylinderkopf B verzichtet.

Die Auswertung der gemittelten Oberflächenschnelle in Hochrichtung bei einer Drehzahl von 1500 1/min (Abb. 6.3) zeigt, daß die Zylinderkopfvariante B mit der integrierenden Bauweise der Nockenwellenlagerung sowohl bei niedriger Last ( $M_d = 100 \text{ Nm}$ ) als auch bei Vollast ( $M_d = 250 \text{ Nm}$ ) im Frequenzbereich von 1000 Hz bis 5000 Hz deutlich geringere Oberflächenschnellen in Hochrichtung aufweist.

Die Pegel der Oberflächenschnelle zeigen bei niedriger Last eine Pegeldifferenz von bis zu 12 dB(A) zwischen 3000 Hz und 4000 Hz. Bei Vollast kann in einem weiten Frequenzbereich von 1500 Hz bis 4000 Hz eine Pegeldifferenz von 6 dB(A) aufgezeigt werden. Unterhalb einer Frequenz von 1000 Hz sowie oberhalb von 4000 Hz liegen die Pegel bei vergleichbaren Werten.

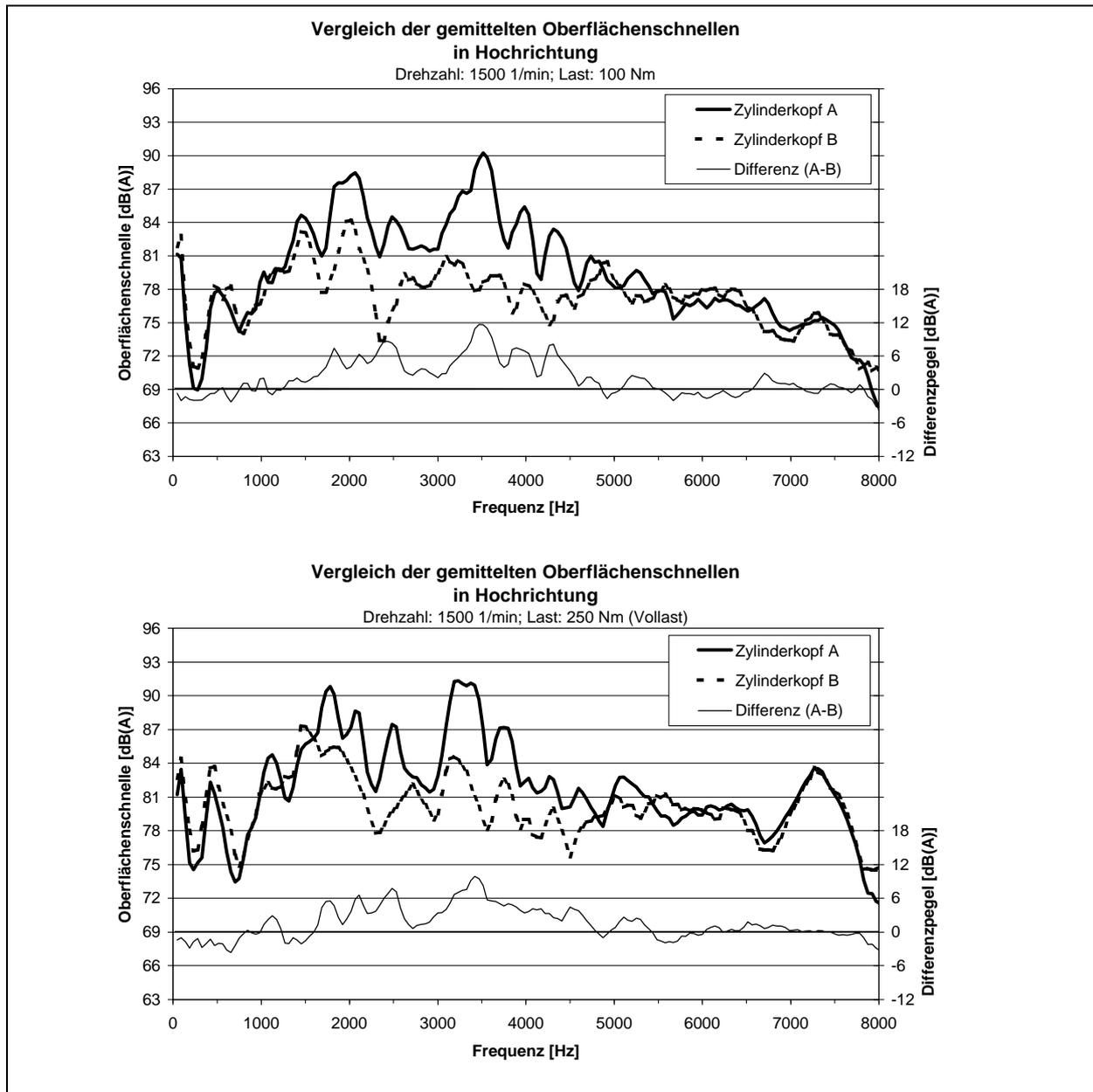


Abb. 6.3: Vergleich der gemittelten Oberflächenschnellen in Hochrichtung (n=1500 1/min)

Die Körperschallpegel bei einer Drehzahl von 3000 1/min (Abb. 6.4) zeigen vergleichbare Ergebnisse wie bei 1500 1/min. Sowohl bei niedriger Last als auch bei Vollast lassen sich bei der Zylinderkopfvariante B deutlich niedrigere Pegel nachweisen. Auch hier tritt die höchste Pegelreduktion im Frequenzbereich von 1500 Hz bis 4500 Hz auf. Bei niedriger Last beträgt die Pegelreduktion zwischen 6 und 11 dB(A). Bei Vollast kann eine Pegelreduktion von bis zu 10 dB(A) nachgewiesen werden. Auch im Frequenzbereich oberhalb 4500 Hz kann bei der Variante mit integrierter Nockenwellenlagerung in der Zylinderkopfhaube kein Anstieg der Körperschallpegel gefunden werden. Damit kann nachgewiesen werden, daß die durch die Bauweise zu erwartende Verschlechterung des Körperschallverhaltens durch eine erhöhte Einleitung der Ventiltriebskräfte nicht feststellbar ist. Durch die kompakte und steife Bauweise wird dies kompensiert.

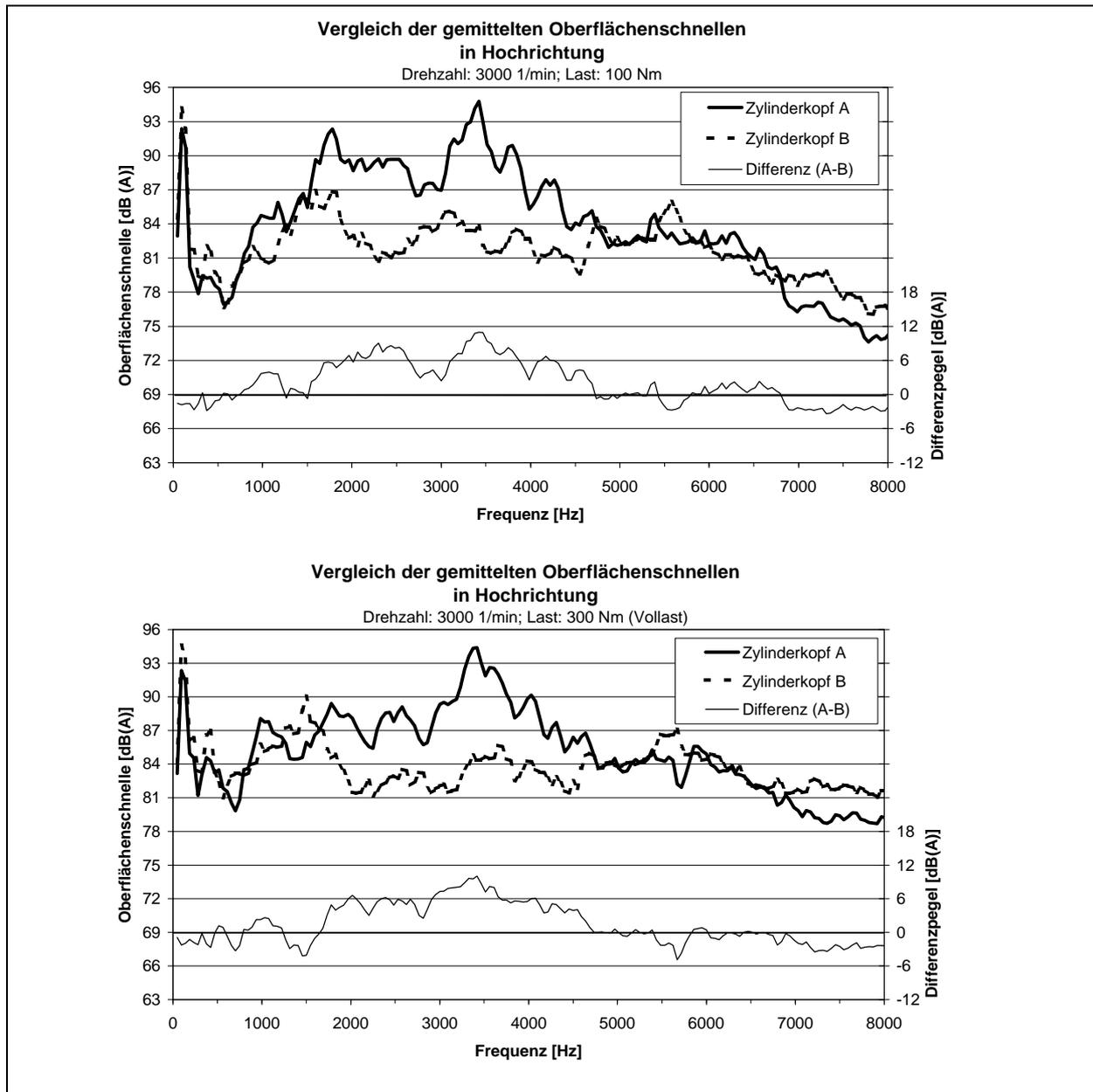


Abb. 6.4: Vergleich der gemittelten Oberflächenschnellen in Hochrichtung (n=3000 1/min)

Bei der Auswertung der Meßpositionen in Längs- und Querrichtung können höhere Körperschallpegel bei der Zylinderkopfvariante B aufgezeigt werden (Abb. 6.5). Bei Variante A sind der untere Teil und die Seitenwände des Zylinderkopfes sehr steif ausgebildet, um die zu erwartenden Schwingungen der Zylinderkopfseitenwände zu reduzieren, da über die gesamte Länge keine Querverbindung der Seitenwände möglich ist. Die Seitenwände der Variante B können aufgrund der vorhandenen Querversteifung durch die Nockenwellenlagerung mit geringerer Wandstärke ausgeführt werden. Diese im Vergleich zu Zylinderkopf A dünne Seitenwandstruktur führt dazu, daß die gemessene Oberflächenschnelle von Variante B in diesem Bereich des Zylinderkopfes deutlich über der von Variante A liegt. Für weitere Verbesserungen sind in diesem Bereich zusätzliche Versteifungsmaßnahmen (z.B.: Wandstärkenerhöhung, Verrippung) erforderlich.

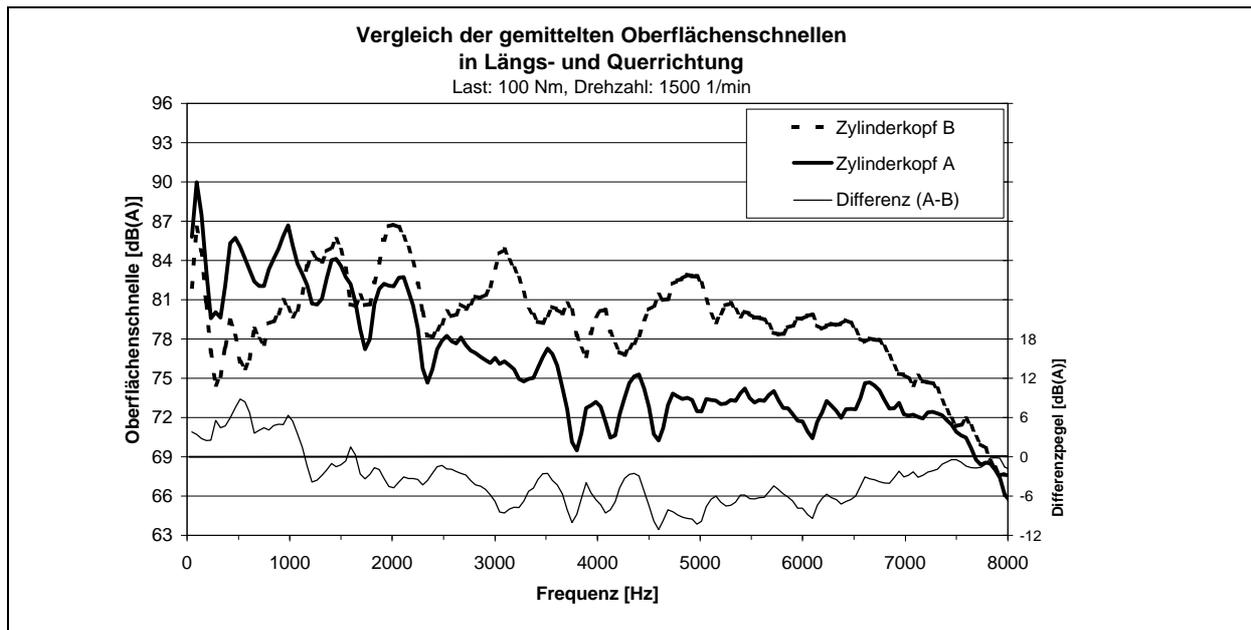


Abb. 6.5: Vergleich der gemittelten Oberflächenschnellen in Querrichtung (n=1500 1/min)

Mit Hilfe der Auswertung des Körperschallverhaltens auf dem Zylinderkopf ist es möglich, Unterschiede der beiden Konstruktionsvarianten darzustellen. Die gemessenen Oberflächenschnellen der beiden betrachteten Zylinderköpfe zeigen deutliche Vorteile zugunsten der Zylinderkopfstruktur mit integrierter Nockenwellenlagerung. Im Frequenzbereich von 1000 Hz bis 4500 Hz kann eine Pegelreduktion bis zu 12 dB(A) nachgewiesen werden, die im gesamten untersuchten Drehzahl- und Lastbereich des Motors wirkt.

### 6.2.2 Einfluß der Strukturmodifikation auf den Luftschall

Zur Überprüfung der Strukturmodifikation auf ihre Wirksamkeit im Luftschall werden Messungen in einem reflexionsarmen Prüfstand durchgeführt. Für die Untersuchungen wird das Kurbelgehäuse sowie die Ansauganlage und die Nebenaggregate des Motors mit schalldämmendem Material abgedeckt, so daß weitgehend nur die Abstrahlung des Zylinderkopfes gemessen werden kann. Zur Potentialabschätzung auf den gesamten Luftschall des Motors werden auch Messungen mit nicht abgedeckter Struktur durchgeführt, so daß der Einfluß der Schallabstrahlung des Zylinderkopfes auf den gesamten abgestrahlten Luftschall bestimmt werden kann.

## Vergleich der Zylinderkopfstrukturen: Summenpegel

Zum Vergleich der Luftschallabstrahlung der beiden Zylinderköpfe wird der Summenpegel des Schalldruckes in verschiedenen Betriebszuständen verglichen (Abb. 6.6).

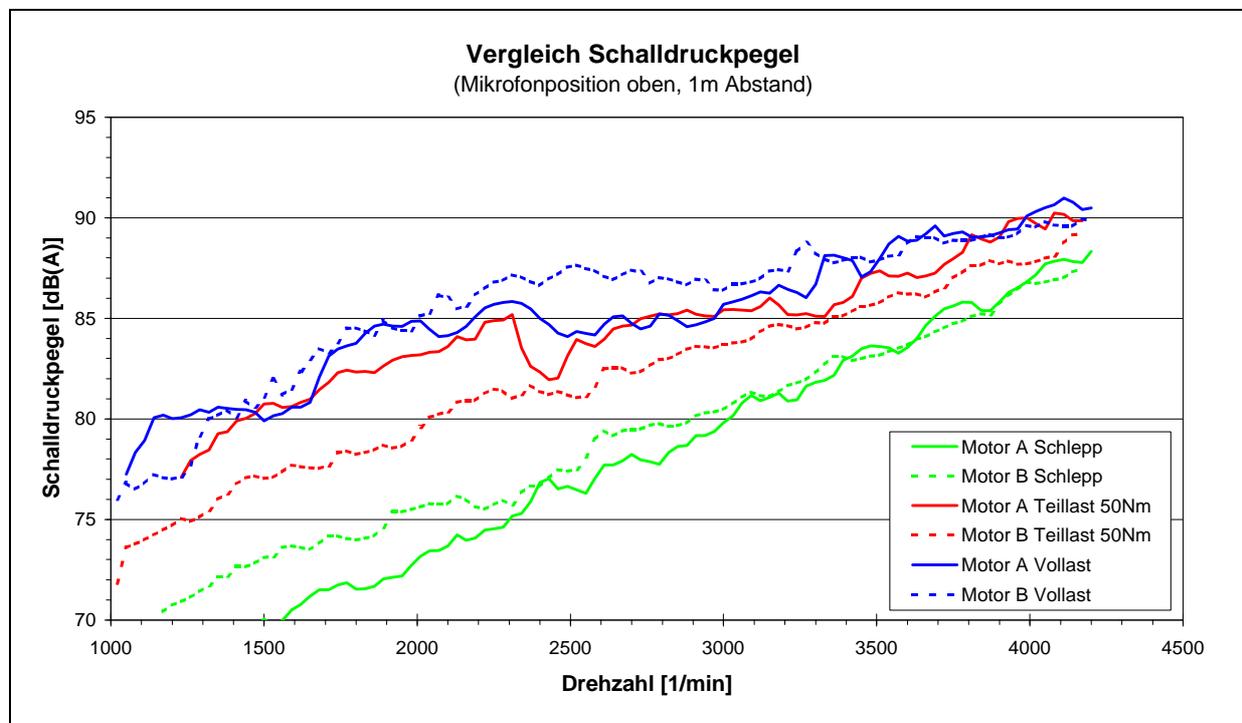


Abb. 6.6: Vergleich Schalldruckpegel

Die Darstellung des Summenpegels über der Drehzahl in verschiedenen Lastzuständen zeigt, daß mit der Zylinderkopfvariante von Motor B im Teillastbetrieb ( $M_d = 50 \text{ Nm}$ ) bei Drehzahlen bis 2300 1/min eine Pegelreduktion von bis zu 4 dB(A) zu erreichen ist. Bei Drehzahlen über 2300 1/min beträgt die Pegelreduktion bis zu 2 dB(A). Im Schlepp zeigt sich bei Variante B im Drehzahlbereich bis 2200 1/min eine Erhöhung des Summenpegels um bis zu 3 dB(A). Eine Pegelanhebung von 3 dB(A) kann bei Vollast im Drehzahlbereich von 2200 1/min bis 3000 1/min festgestellt werden. Die höheren Pegelwerte im Schleppbetrieb können dabei auf hohe Pegel im tieffrequenten Bereich zurückgeführt werden. Zudem kann eine vollständige Abdeckung der Sauganlage während der Messung nicht gewährleistet werden und liefert somit noch einen Beitrag zum gemessenen Schalldruckpegel.

Eine Analyse des Summenpegels im Frequenzbereich von 1,5 kHz bis 4,5 kHz (Bandpaßfilter) soll aufzeigen, ob sich das im Körperschall aufgezeigte Potential im Luftschall nachweisen läßt (Abb. 6.7). Im Schlepp und unter Vollast liegen die Pegelverläufe der beiden Varianten auf vergleichbarem Niveau und die zuvor im Summenpegel festgestellten Differenzpegel in diesen Betriebspunkten sind geringer. Die Analyse eines Teillasthochlaufes zeigt, daß sich das im Körperschall aufgezeigte

Potential einer Pegelreduktion im Luftschall nachweisen läßt. Die Reduktion beträgt im betrachteten Frequenzbereich zwischen 5 dB(A) bis 2300 1/min und 2-3 dB(A) oberhalb von 2300 1/min. Die höheren Pegel im Vollastbetrieb von Motor B können auf die ungünstige Gestaltung der Sauganlage zurückgeführt werden.

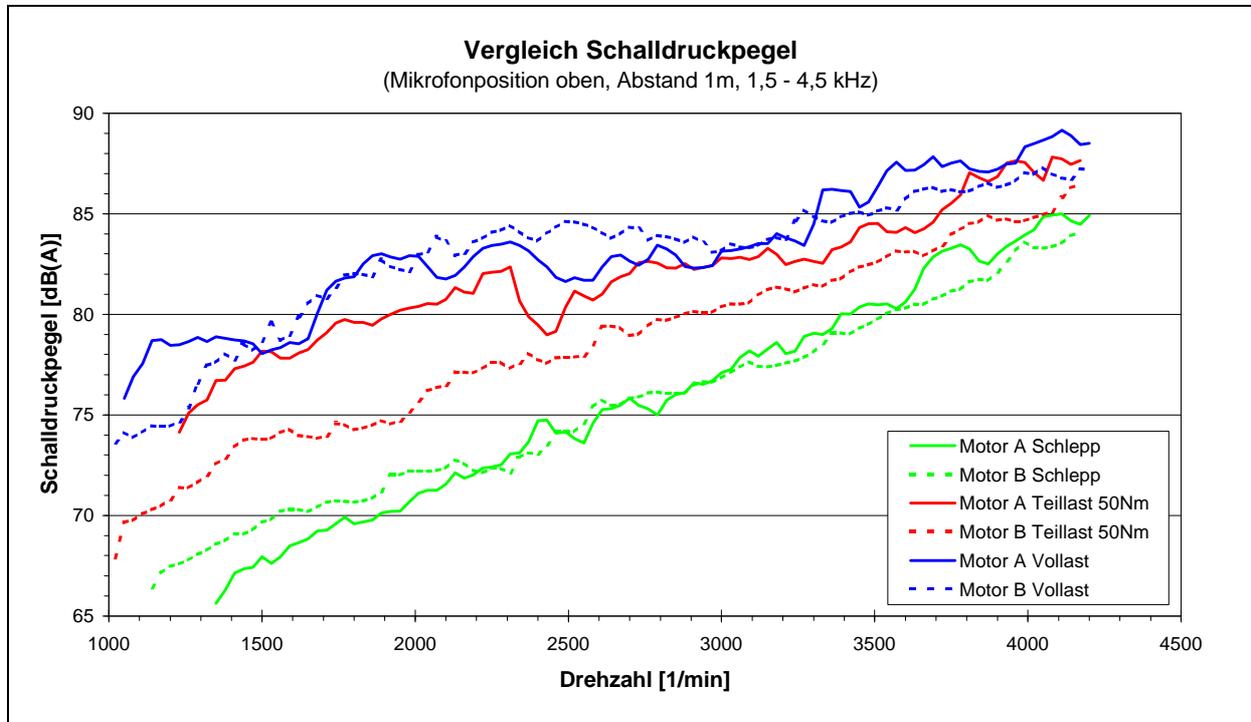


Abb. 6.7: Vergleich Schalldruckpegel (1,5 – 4,5 kHz)

### Vergleich der Zylinderkopfstrukturen: Campbell-Darstellung

Die spektrale Darstellung der drei Betriebszustände der beiden Motoren erfolgt in den Campbell-Diagrammen der Abbildungen 6.8 und 6.9. Dabei wird der Schalldruckpegel über Drehzahl und Frequenz in farblicher Codierung dargestellt. Im Vergleich der beiden Motoren ist zu erkennen, daß die Spektren von Motor A ihre höchsten Pegel im Frequenzbereich von 500 Hz bis 4000 Hz aufweisen. Die Spektren von Motor B zeigen dabei geringere Pegel im angegebenen Frequenzbereich. Die größten Pegeldifferenzen sind vor allem im Teillastbetrieb des Motors nachzuweisen. Dies deckt sich mit den durch die Körperschalluntersuchungen aufgezeigten Verbesserungen der Strukturmodifikation und kann durch die Luftschalluntersuchungen bestätigt werden.

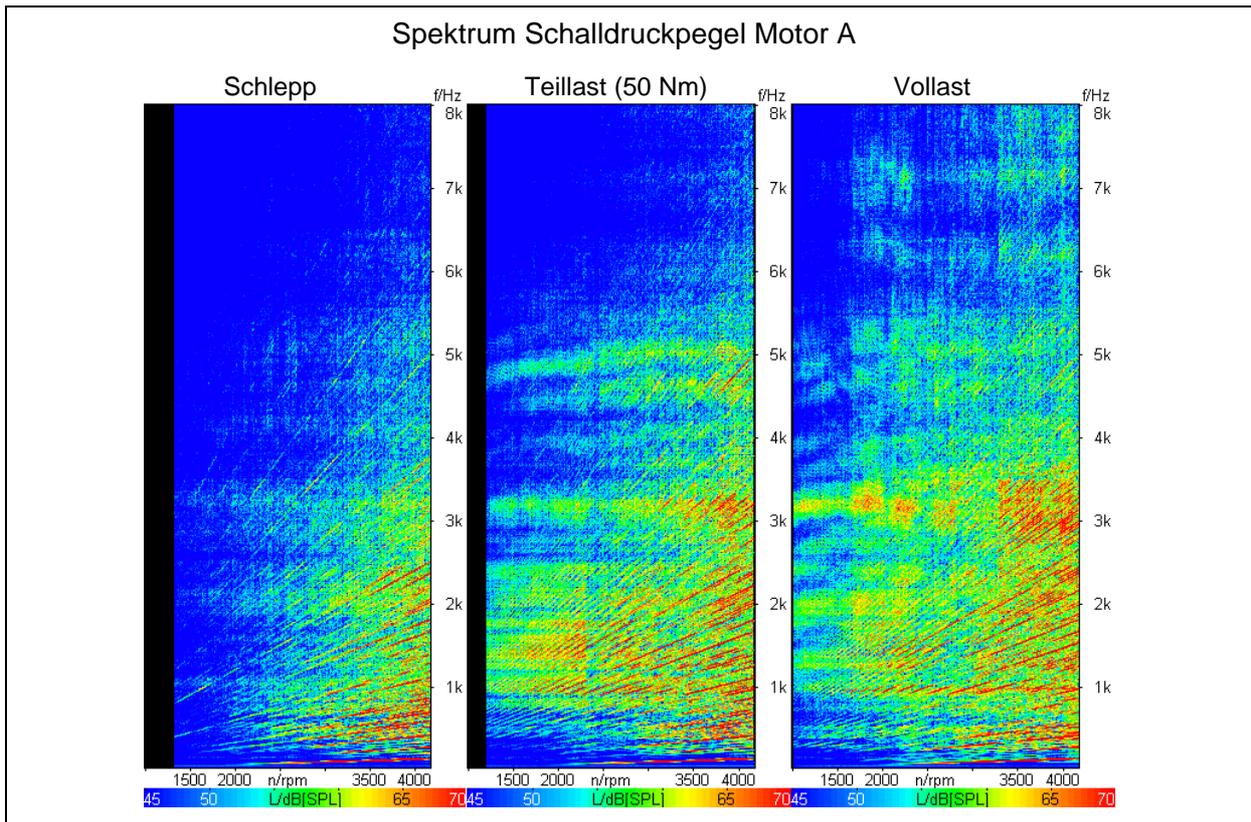


Abb. 6.8: Campbell - Diagramm Lastvariation Motor A

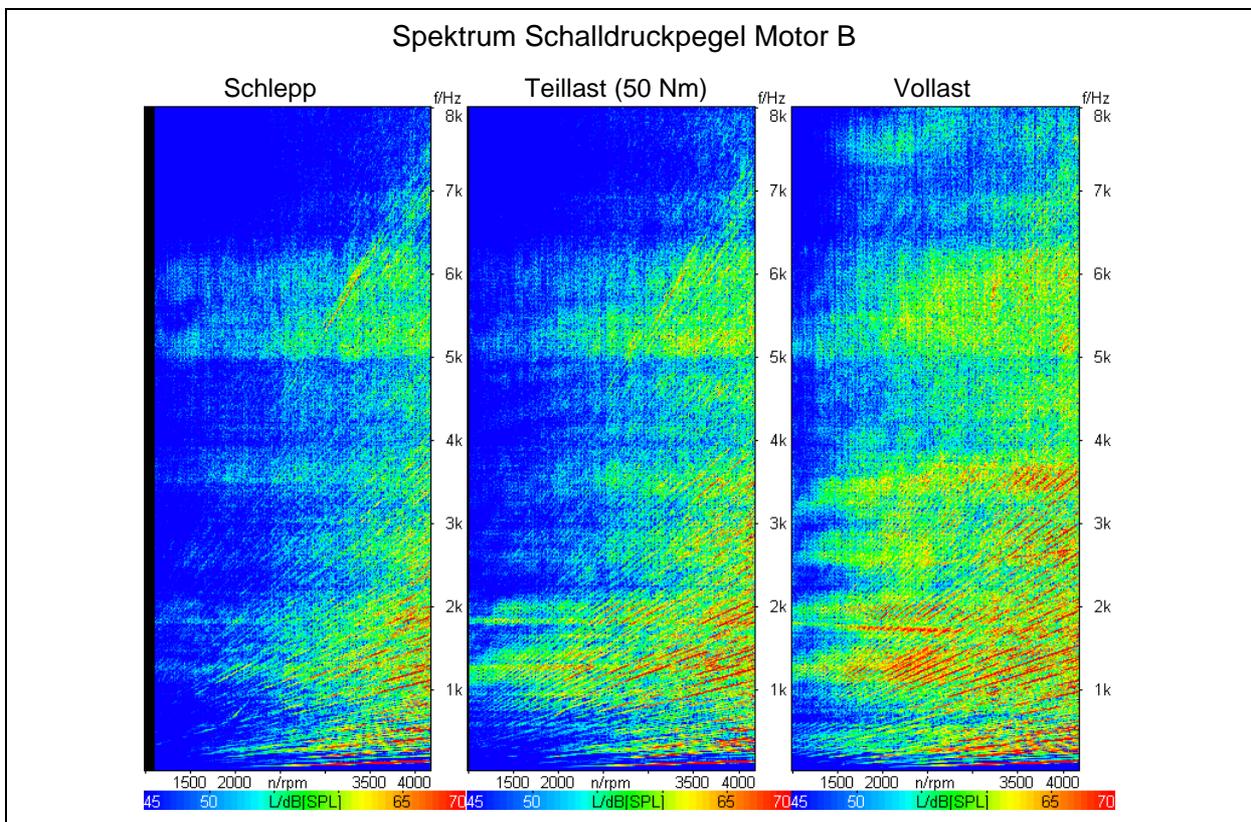


Abb. 6.9: Campbell - Diagramm Lastvariation Motor B

Im Vollastbetrieb zeigen sich bei Motor B hohe Pegel im Bereich von 1300 Hz zwischen 2000 1/min und 3000 1/min. Dieser Pegelanstieg kann durch eine Teilschallquellenanalyse mit Variation der Abdeckungen der Motoroberfläche auf die Abstrahlung der Sauganlage zurückgeführt werden.

Im Schlepp ergeben sich bei Motor A unterhalb 1000 Hz die höchsten Pegelwerte. Bei Motor B treten die höchsten Pegelwerte erst oberhalb 1000 Hz auf. Zudem ist im Frequenzbereich oberhalb 5000 Hz ein ausgeprägtes Band mit höheren Pegeln zu erkennen. Dieses Frequenzband ist auf die Integration des Ventiltriebes in die Struktur zurückzuführen und kann als Nachteil des Konzeptes bezeichnet werden. Die Zunahme der Pegel in diesem Frequenzbereich führt jedoch nicht zu einer Verschlechterung des subjektiven wahrnehmbaren Klangbildes. Die Pegelreduktion im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 4000 Hz führt zu einer deutlichen Verbesserung des impulshaltigen und rauhen Motorklangs. Diese subjektive Wahrnehmung kann durch die Auswertung der spezifischen Rauigkeit bestätigt werden (Abb. 6.10). Es zeigt sich im Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 2 kHz eine Reduktion der Rauigkeit. Die Zunahme der spezifischen Rauigkeit im Frequenzbereich von 5 kHz bis 6 kHz kann auf das höhere Ventiltriebsgeräusch zurückgeführt werden. Die höheren Pegelwerte und die höhere spezifische Rauigkeit in diesem Frequenzbereich können aufgrund der deutlichen Reduktion im Frequenzbereich zwischen 0,5 kHz und 4 kHz akzeptiert werden. Die Pegel im Frequenzbereich oberhalb 3000 Hz lassen sich durch die Verwendung einer Kapselung effektiv reduzieren.

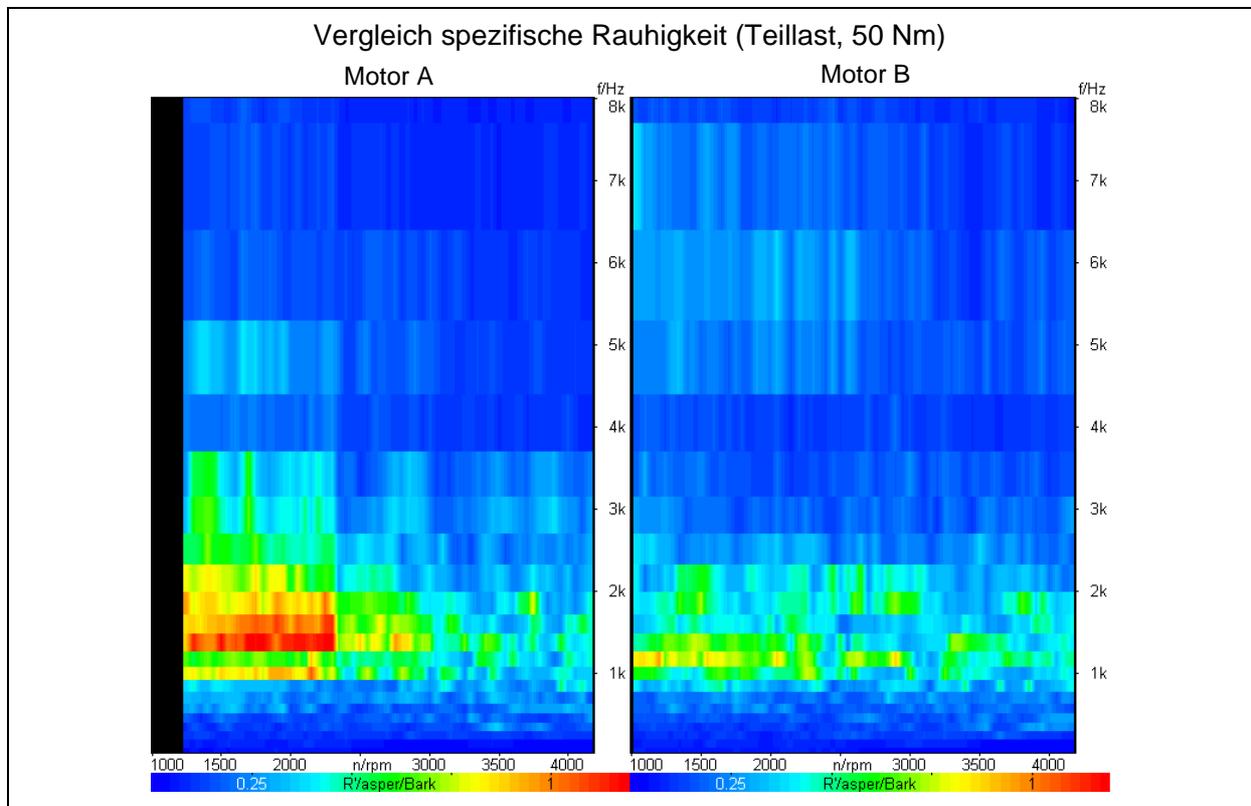


Abb. 6.10: Vergleich der spezifischen Rauigkeit

### 6.2.3 Einfluß der Strukturmodifikation auf das Abstrahlverhalten

Zur weiteren Charakterisierung des Einflusses der Strukturmodifikation auf die Geräuschemission des Motors werden in folgenden Untersuchungen zur Abstrahlcharakteristik der Zylinderköpfe vorgestellt. Dazu wird der Zylinderkopf mit Hilfe eines Impulshammers im Bereich der Injektorbohrung am Zylinderkopfboden angeregt. Die Luftschallabstrahlung wird auf einer Hüllfläche im Abstand von 15 cm im Nahfeld des Zylinderkopfes mit Hilfe einer Schallintensitätsmeßsonde bestimmt.

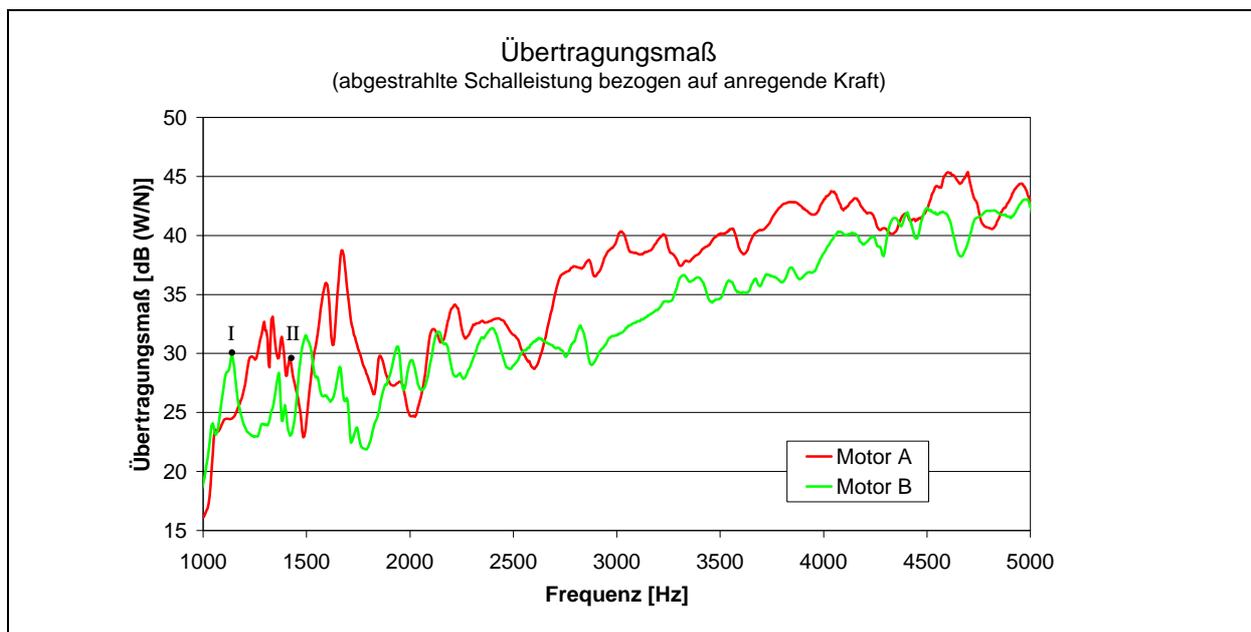


Abb. 6.11: Vergleich der Schalleistung bei Fremdanregung

Die auf die anregende Kraft bezogene Schalleistung als Integral über der Hüllfläche ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Wie auch bei den Betriebsmessungen im Körper- und Luftschall kann hier eine Pegelreduktion zugunsten des Zylinderkopfes von Motor B aufgezeigt werden. Große Pegeldifferenzen treten dabei im Frequenzbereich zwischen 1000 Hz und 4000 Hz auf. Hier ist zu erkennen, daß die auch bereits im Körperschall der Einzelmeßstellen nachweisbaren lokalen Eigenformen der Zylinderkopfhäube von Motor A zu einer erhöhten Abstrahlung führen (Kap. 6.2.1). Ein Vergleich der Abstrahlcharakteristik der Zylinderköpfe bei einzelnen Frequenzen (I, II) wird in Abb. 6.12 gezeigt. Dabei ist zu erkennen, daß die Maxima in der Schalleistungsmessung auf lokale Eigenformen der Zylinderkopfhäuben mit lokal hoher Abstrahlung zurückzuführen sind.

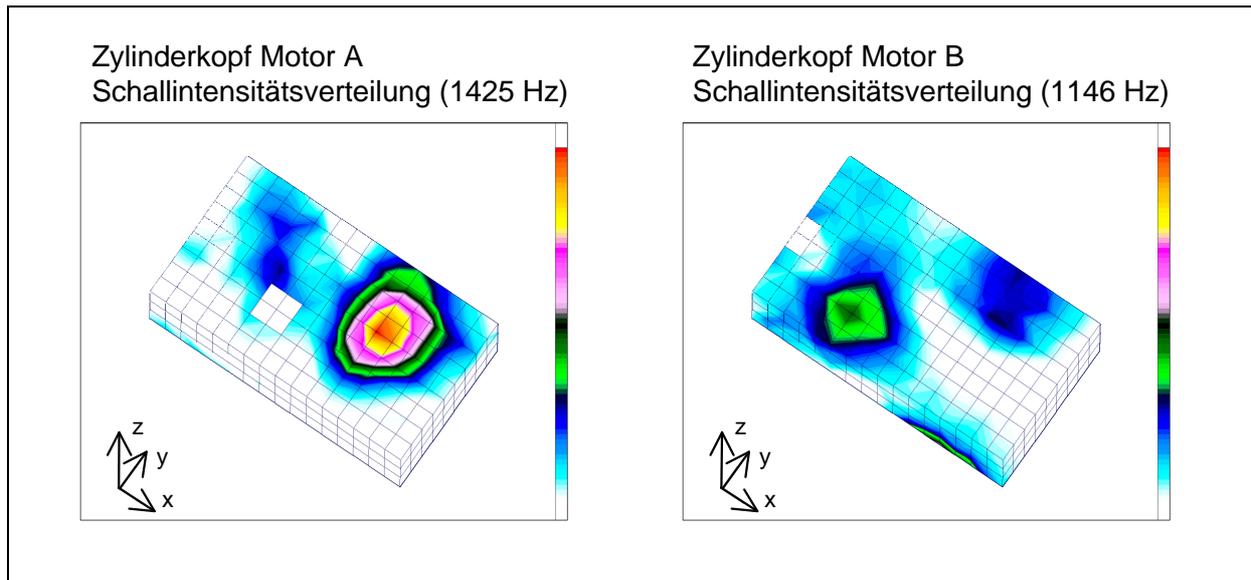


Abb. 6.12: Vergleich der Abstrahlcharakteristik mittels Intensitätsmessung

### 6.3 Einfluß der Verbrennung auf Körper- und Luftschall

Wie in Kapitel 5 bereits dargestellt, kann durch Variation der Verbrennung das Spektrum der anregenden Kraft beeinflusst werden. Nachfolgend wird aufgezeigt, wie sich eine Änderung des Spektrums der Verbrennungsanregung auf den Körper- und Luftschall des Motors auswirkt. In Abbildung 6.13 werden die Druckspektren einer Einspritzparametervariation aufgezeigt. Des weiteren werden die Mittelwerte der Körperschallspektren der Beschleunigungsaufnehmer am Zylinderkopf von Motor A dargestellt. Es zeigt sich, daß Pegeländerungen, die im Spektrum des Zylinderdruckverlaufes zu erkennen sind, auch im gemittelten Körperschallspektrum des Zylinderkopfes nachzuweisen sind. Zur weiteren Beurteilung ist das Spektrum des Luftschalls dargestellt. Betrachtet wird der Mittelwert der in 1 m Abstand vom Motor aufgestellten Mikrofone (oben, rechts, links). Die Differenz der Pegel der beiden Druckspektren, die im Körperschall noch zu erkennen ist, kann im Luftschallsignal in deutlich geringerer Höhe nachgewiesen werden. Das Luftschallspektrum enthält eine Vielzahl von Spitzen im Pegelverlauf, die durch die Variation der Verbrennung nicht zu beeinflussen sind. Lediglich im Frequenzbereich um 1600 Hz und unterhalb von 600 Hz kann die im Druckspektrum und Körperschallspektrum zu erkennende Pegeldifferenz von bis zu 5 dB(A) festgestellt werden. In den übrigen Frequenzbereichen ist die Pegeländerung, die im Spektrum der Anregung und im Körperschall auf dem Zylinderkopf erkannt werden kann, im Luftschall nicht eindeutig nachweisbar. Der Pegel des Luftschallsignals wird demnach von Bauteilen mit hoher Abstrahlung bei eventuell anderen anregenden Kräften dominiert.

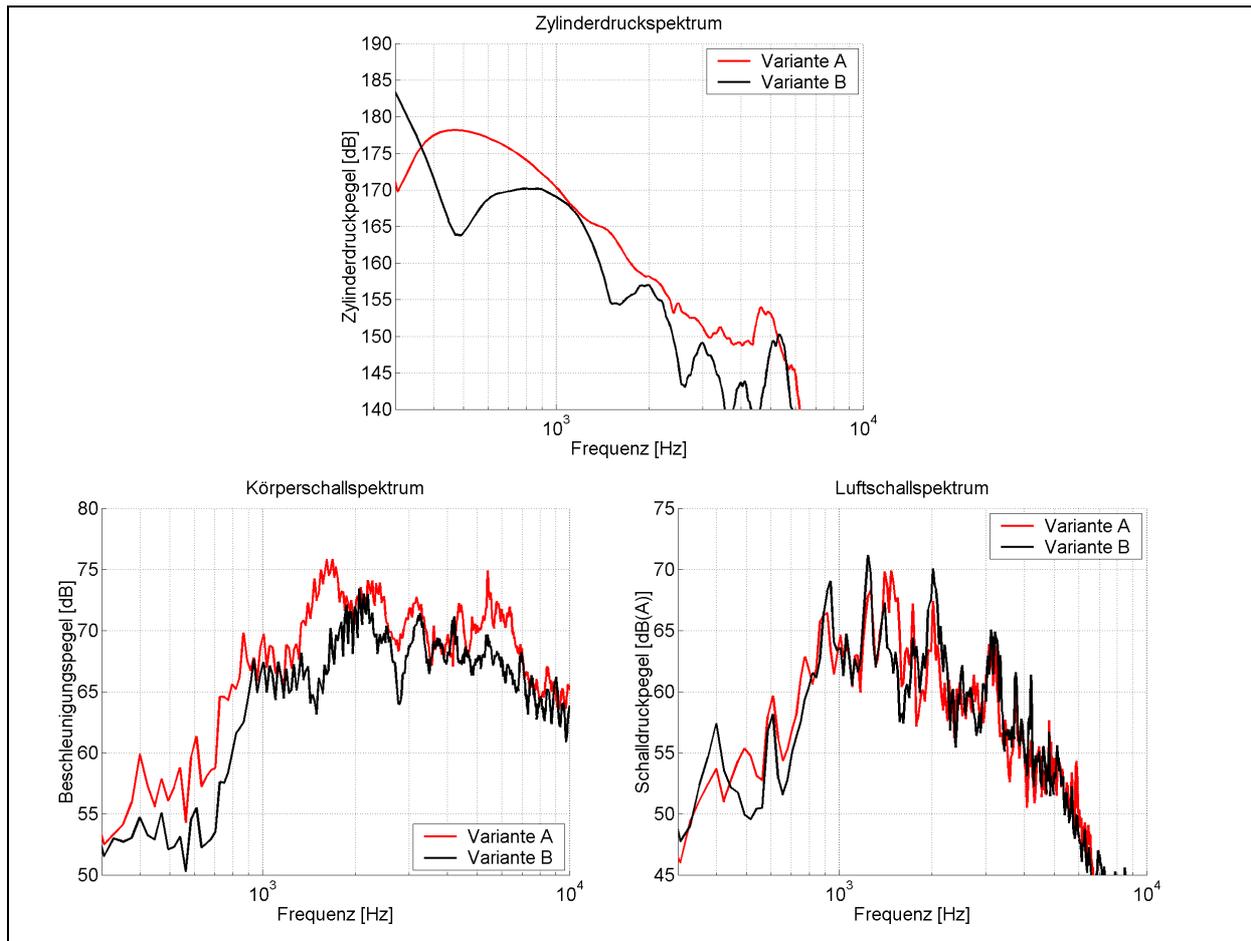


Abb. 6.13: Einfluß der Zylinderdruckanregung auf Körper- und Luftschallspektrum (Motor A)

Es kann belegt werden, daß zur Optimierung des Motorengeräusches eine alleinige Betrachtung des Luftschallsignals oft nicht ausreicht. Erst durch die Betrachtung des Quellsignals (Brennraumdruckverlauf) und durch die Analyse des Beitrags einzelner Komponenten mittels Körperschallmessungen oder mit Hilfe der Abdeckmethode kann ermittelt werden, welche Komponenten der Motorstruktur modifiziert werden müssen, damit eine effektive Pegelreduktion des Luftschalls erreicht werden kann. Durch die Verwendung von Körperschallmessungen an Teilstrukturen kann zudem eine Modifikation der Struktur objektiv bewertet werden. Durch Luftschallmessungen kann diese Modifikation in ihren Auswirkungen auf das Motorgesamtgeräusch bewertet werden.