

Untersuchungen zum akustischen Verhalten von Ansaugsystemen bei Motorrädern

Analysis of the Acoustic Behaviour of Intake Systems in Motorcycle Engines

Wolfgang Foken, Sirko Pohl, Guido Bau

Kurzfassung / Abstract

Ansaugsysteme mit Air-Box „kleiner“ Motorradmotoren strahlen eine spezifische Geräuschkomponente ab. Simulationsverfahren und experimentelle Untersuchungen zur Vorhersage des akustischen Verhaltens der Ansaugsysteme sind sowohl für die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben als auch für die Sound-Qualität notwendig.

Die Arbeit stellt einen Prüfstand für die Untersuchung des akustischen Verhaltens von Ansaugsystemen für Motorräder vor. Die Separation des „Air-Box-Geräusches“ im realen Motorbetrieb ist aufgrund des Motorgeräusches nicht möglich. Das vorgestellte Gaswechsel-System ist durch eine rotierende Scheibe mit einem Ausschnitt gekennzeichnet, wobei ein Ansaugrohr analog zu Ventilen im realen Motor geöffnet und geschlossen wird.

Abschließend stellt die Arbeit akustische Untersuchungen zur Optimierung von Air-Box-Konfigurationen vor.

Intake systems of small engines especially for motorcycles create a specific noise radiation. Simulation methods and experimental investigations to analyse and predict the acoustical behaviour of intake systems for motorcycles are required in order to pass current noise control legislation and to achieve a pleasant sound.

This paper presents the design of a test bench for the investigation of air-boxes for motorcycles. The investigation of the air-box sound at real engine operation is impossible because of the noise produced by the engine. The created gas exchange system is distinguished by a rotating disc with a cut-out section, which opens and closes a pipe instead of the valves in the real engine.

Finally, the paper presents acoustical investigation of air-boxes. Different configurations of the air-box were defined to evaluate the acoustical properties.

1 Einleitung

Die Nutzung von Motorrädern hat sich in den vergangenen Jahren deutlich verändert. Aus einem reinen Transportmittel ist ein Freizeit- und Sportgerät geworden. Motorräder spielen mit ca. 2% Anteil an der Gesamtfahrleistung aller Straßenfahrzeuge keine nennenswerte Rolle. Dennoch nehmen Motorräder eine Spitzenstellung in der Lärmbelastigung ein, obwohl die zulässigen Vorbeifahrtpegel, z.B. für Motorräder über 500cm³, innerhalb der letzten 20 Jahre von 86 auf 80 dB(A) gesenkt wurden. Trotzdem liegen Motorräder hinsichtlich des Vorbeifahrtpegels,

entsprechend ISO 362, heute immer noch auf dem Niveau von LKW (>150)[1]. Die reale Belästigungswirkung von Motorrädern ist aber aufgrund der Fahrweise, der Geräuschcharakteristik, der Bevorzugung besonderer Fahrstrecken und teilweise nicht zugelassener Abgasschalldämpfer erheblich höher [2]. Es ist zu erwarten, dass sowohl die Emissionsgrenzwerte, als auch die Verfahren zur Berechnung der Immissionen diesen veränderten Bedingungen Rechnung tragen.

Somit kommen auf Motorradentwickler und -hersteller im Rahmen des Sound Engineering sehr unterschiedliche Aufgaben und Zielkonflikte zu. Erstens geht es um die Verringerung des belästigenden Geräusches. Zweitens besteht die Notwendigkeit die relevanten gesetzlichen Grenzwerte einzuhalten und nicht zuletzt sollte ein von Käufern akzeptierter Sound entstehen, der sowohl für den Motorradtyp als auch für den Hersteller charakteristisch ist.

Eine der Hauptschallquellen am Motorrad ist das Ansaugsystem mit Air-Box. Das spezifische Geräusch dieser Teilschallquelle wird im Sound Engineering häufig als störend empfunden, da es oft dominierende, nicht-drehzahlsynchrone Komponenten enthält. Diese entstehen bei Volllast aufgrund stehender Wellen im Ansaugsystem, die durch die Gaswechsel-Vorgänge angeregt werden.

Zur exakten Analyse und Optimierung der Teilschallquelle „Ansaugsystem mit Air-Box“ ist eine Abkopplung dieser Teilschallquelle von den anderen Geräuschquellen des Motorrades unverzichtbar.

2 Stand der Technik

Das Ansaugsystem einschließlich der Air-Box ist Teil des Motorradmotors. Somit bieten sich akustische Untersuchungen an einem normalen, schallabsorbierend ausgekleideten Motorprüfstand an [3]. Trotz weit fortgeschrittener Mess-, Analyse- und Aufzeichnungstechnik ist eine wünschenswerte komplette Separation des Ansauggeräusches am Motorenprüfstand unmöglich. Im Wesentlichen sind drei unterschiedliche Separationsmethoden denkbar

- **Isolation des Ansauggeräusches durch Kapselung aller andern Geräuschquellen**

Einerseits verhindern schwer lösbare thermische Probleme dieses Vorgehen. Andererseits werden die akustischen Eigenschaften des Ansaugsystems zum Beispiel durch nicht dem Serienzustand entsprechende Saugrohrängen verändert.

Eine Kapselung des Ansaugsystems scheidet aufgrund der räumlichen Verhältnisse (Notwendigkeit einer absorbierend ausgekleideten Kapsel in der die akustischen Messungen durchgeführt werden) aus.

- **Durchgehende numerische Simulation der strömungs-angeregten Geräuschquelle einschließlich der Schallabstrahlung der Air-Box**

Dieser Weg ist theoretisch problemlos möglich, da die entsprechenden Softwarewerkzeuge auf dem Markt vorhanden sind (PROMO, WAVE, KIWA, FIRE, SYSNOISE...). Problematisch sind die hohen Anschaffungskosten, das Personal mit großer Erfahrung in der Handhabung der Software sowie die Bereitstellung experimentell ermittelter Randbedingungen bzw. Eingangsdaten.

- **Künstliche Erzeugung der quasi-periodischen Strömung aufgrund der Gaswechsel-Vorgänge im Motor ohne Nutzung des jeweiligen Motors [4]**
Dieser Weg basiert auf einem eigenständigen Prüfstands Aufbau, der mit erheblichem Aufwand, einschließlich dem Bau einer semi-reflexionsarmen Messzelle, verbunden ist. Als Strömungserzeuger könnte auch ein unbefuerter Verbrennungsmotor genutzt werden. Die flexible Anpassung eines solchen Systems an unterschiedliche Motortypen wäre jedoch schwierig. Es bleiben außerdem die Problem mit sekundären, schwer eliminierbaren Geräuschquellen z. B. aus dem Ventiltrieb

Aufgrund der geschilderten Problematik, wurde für den Prüfstand eine eigenständige Generierung des quasi-periodischen Volumenstroms gewählt, die störende Schallquellen und Vibrationen weitgehend vermeidet [5].

3 Gaswechsel-System

Um den Gaswechselprozess im Ansaugsystem eines realen 4-Takt Motors auf dem Prüfstand zu simulieren sollte das „künstliche“ Gaswechsel-System folgende Kriterien erfüllen

- Kompaktes abgeschlossene System,
- niedriger Störgeräuschpegel des Prüfstandes,
- keine störenden Vibrationen beim Prüfstandsbetrieb,
- Realisierung von „Motordrehzahlen“ bis 10.000 min^{-1} ,
- Simulationsmöglichkeit für Motoren bis 4 Zylinder mit insgesamt bis 1.000 cm^3 Hubraum,
- hinreichend gute akustische Raumeigenschaften für Schallleistungsbestimmungen bzw. Schallquellenortungen.

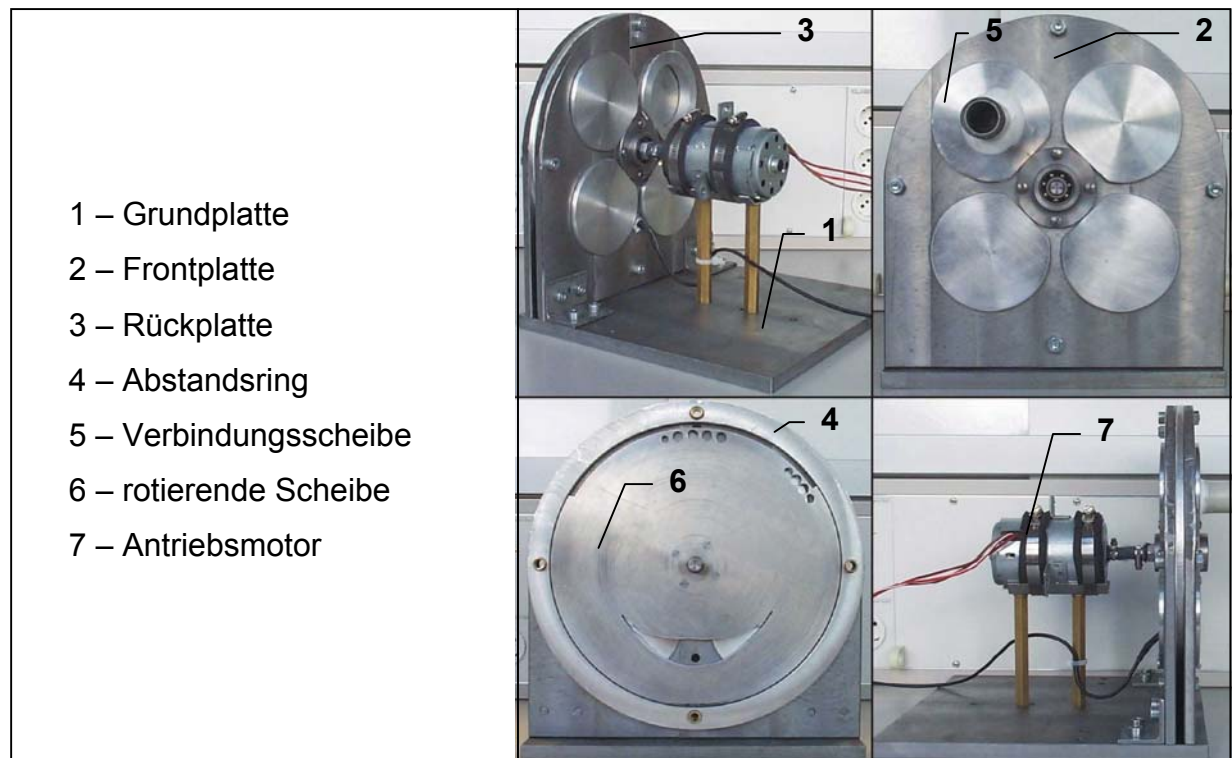


Bild 1: Funktionsmuster des Gaswechsel-Systems

Die Grundstruktur des Gaswechsel-Systems besteht aus einer rotierenden Scheibe mit einem Ausschnitt, der analog zur Öffnung der realen Einlassventile das Ansaugrohr freigibt. Das Ansaugen des jeweiligen Zylinders wird durch ein Rosts-Gebläse simuliert. Dieses System erzeugt einen, dem realen Motorbetrieb ähnlichen, pulsierenden Luftstrom, der bei exakter Einhaltung der entsprechenden Rohrlängen und -durchmesser auch das charakteristische Geräusch des realen Ansaugsystems anregt. Der Antrieb erfolgt mittels eines Gleichstrommotors, dessen Drehzahl der Nockenwellendrehzahl entspricht. Erreicht wurden 5.500min^{-1} , dies entspricht einer Motordrehzahl von 11.000min^{-1} . Bild 1 zeigt die Details des ersten Funktionsmodells des Gaswechsel-Systems

Die exakte Berechnung der Geometrie des Ausschnittes in der rotierenden Scheibe und des Querschnittes der Verbindung zwischen Gaswechsel-System und Ansaugrohr ist für die Funktionsweise des Prüfstandes besonders problematisch, da die Querschnittsfreigabe durch die Einlassventile möglichst exakt nachgebildet werden muss. Kritisch ist hier vor allem die hohe Dynamik der Änderung des freigegebenen Querschnittes bei realen Einlassventilen. Bild 2 zeigt die berechneten Querschnitte für den Scheibenausschnitt und die Verbindung zum Ansaugrohr im Vergleich mit einer realen Ventilgeometrie für einen 125 cm^3 - Motor.

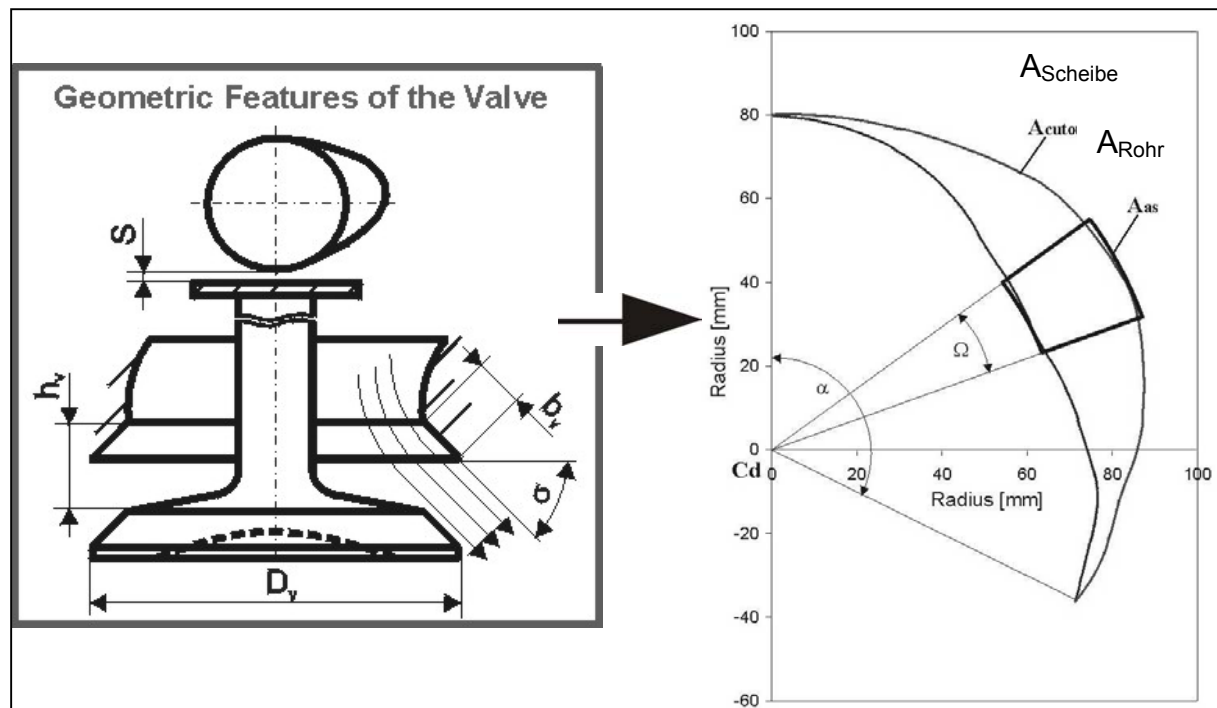


Bild 2: Scheiben- und Rohrquerschnitt des Gaswechselsystems im Vergleich mit der realen Ventilöffnung

Aufgrund des komplexen iterativen Berechnungsmodells für die Querschnittsflächen wurde ein Rechenprogramm entwickelt, das aus den gängigen geometrischen Daten des Ventiltriebes die entsprechenden Geometrien für die Querschnitte berechnet und die Daten für eine CNC-Fräsmaschine aufbereitet. Somit ist eine flexible und schnelle Anpassung des Prüfstandes an unterschiedliche Konfigurationen des Ventiltriebes oder an unterschiedliche Motoren gewährleistet

4 Prüfstandsaufbau und Messtechnik

Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus einem Roots-Kompressor zur Erzeugung des Volumenstromes von mindestens $600 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Druckpulsation bis zu 500 mbar, dem in Abschnitt 3 beschriebenen Gaswechsel-System einschließlich Ansaugrohr und einer Air-Box sowie eventuell der Original-Drosselklappe. Gaswechsel-System und Airbox sind getrennt von den anderen Prüfstandssystemen in einer reflexionsarm ausgekleideten Kammer angeordnet, wobei das Gaswechsel-System nochmals gekapselt ist. Messsysteme für Volumenstrom, Druckpulsation und Drehzahl gehören zur Standardausrüstung des Prüfstandes. In dieser Messkammer sind im Allgemeinen alle akustischen Messungen von der reinen Schalldruck- und Intensitätsmessung über die Schalleistungsbestimmung bis zur Kunstkopfmessung möglich. Bild 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Prüfstandes.

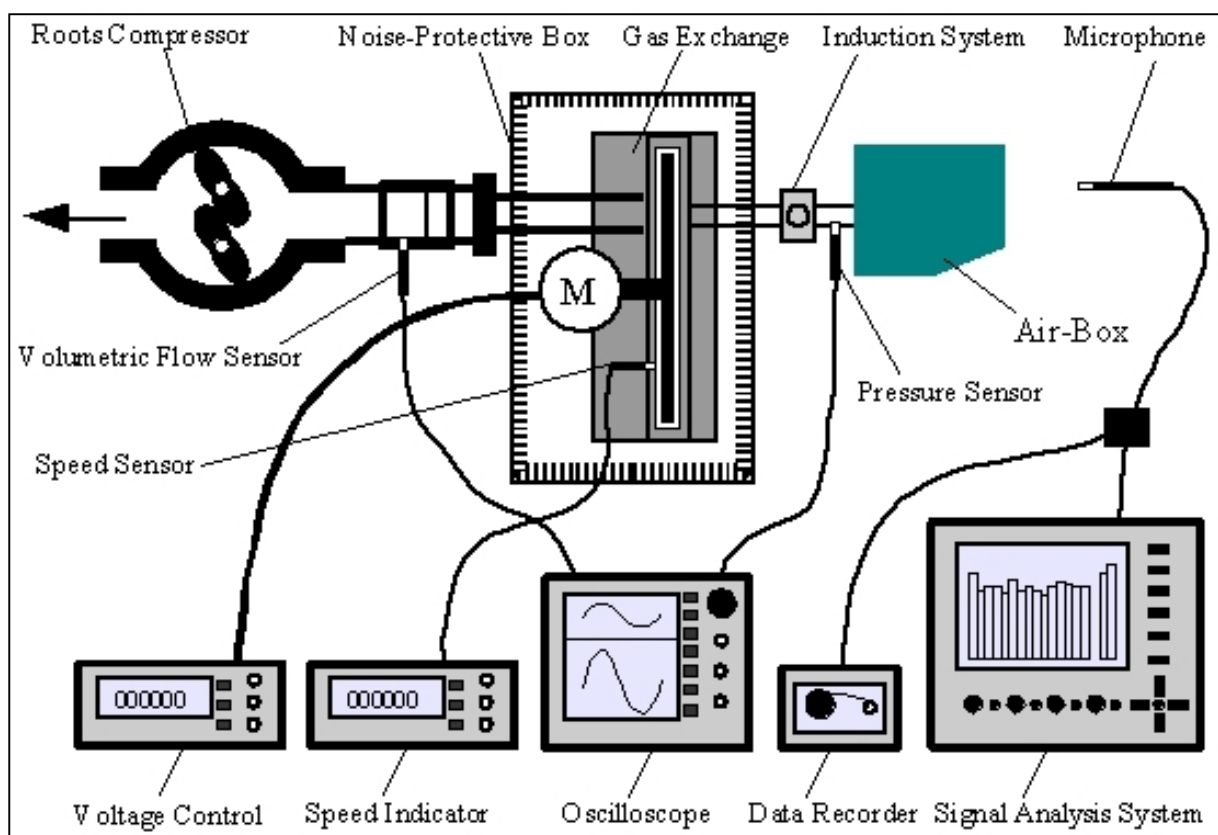


Bild 3: Prinzipieller Prüfstandsaufbau mit Messtechnik

5 Funktionsprüfung des Gaswechsel-Systems

Für akustische Untersuchungen an Ansaugsystemen mit Air-Box, besonders für Aufgaben des Sound Engineering ist die Verifikation der Prüfstandssimulation von herausragender Bedeutung. Fehler würden zum Beispiel ein Geräuschspektrum erzeugen, welches nicht dem realen Motorbetrieb entspricht.

Eine gute Verifikationsmethode ist der Vergleich äquivalenter Druckmessungen im Ansaugrohr am Verbrennungsmotorenprüfstand und am Simulationsprüfstand. Versuche haben gezeigt, dass Druckverlauf und Amplitude des Wechsellruckes maßgeblichen Einfluss auf das spezifische Geräusch der Ansauganlage haben.

Der konkrete Vergleich von Druckmessungen am Motorenprüfstand und am Simulationsprüfstand zeigt große Übereinstimmung hinsichtlich der erreichten Pulsationsamplituden und der niederfrequenten Harmonischen der „Motordrehzahl“. Die Messungen am Simulationsprüfstand weisen jedoch eine merkliche Nullpunktverschiebung des Wechseldruckes auf und höhere Frequenzanteile des realen Motorbetriebs werden nur ungenügend wiedergegeben. Beide Effekte beruhen auf Leckverlusten im Gaswechsel-System und auf Schadvolumina die bei der Öffnung realer Ventile nicht vorhanden sind.

Insgesamt konnte jedoch der Nachweis erbracht werden, dass bereits das Funktionsmuster des Gaswechselsystems beste Möglichkeiten bietet, alle wesentlichen Geräuschkomponenten des Ansaugsystems zu simulieren.

6 Beispiele zur Geräuschanalyse von Ansaugsystemen

6.1 Schallquellenortung an Air-Boxen

Die Air-Box von Motorrädern hat häufig relativ große Oberflächen. Die Schallabstrahlung dieser schwingenden Oberflächen kann also nicht generell vernachlässigt werden. Um die Anteile der einzelnen Flächen genau zu bestimmen ist eine Schellquellenortung nötig. Wichtige Verfahren sind Mikrofon-Arraytechniken, Schalfeldtransformationen und Intensitätsmessverfahren. Bild 4 zeigt den Versuchsaufbau für eine Schallquellenortung mit Intensitätsmessverfahren, bei dem einzelne Rasterpunkte vermessen werden. Aus diesen Messdaten werden Aussagen über die Schallabstrahlung der jeweiligen Fläche gewonnen.



Bild 4: Messaufbau zur Schallquellenortung mittels Intensitätsmesstechnik

6.2 Untersuchungen an Lufthutzen

Lufthutzen bilden oft die „Verbindung“ der Air-Box mit der Ansaugstelle. Einerseits dienen sie zur Leitung und Umlenkung des Luftstromes, andererseits haben sie aufgrund ihrer Drosselwirkung erheblichen Einfluss auf die strömungstechnischen und akustischen Parameter des Ansaugsystems. Gleichzeitig beeinflussen sie nicht unwesentlich die Leistungsdaten der Motorräder. Bild 5 zeigt eindrucksvoll den Einfluss eines unterschiedlich langen Luftführungs Kanals der Lufthutze auf das Geräuschverhalten des Ansaugsystems. Es wird deutlich, dass im Prozess der Prototypenentwicklung eine optimale Auslegung der Lufthutze durch die Nutzung des Simulationsprüfstandes erleichtert wird.

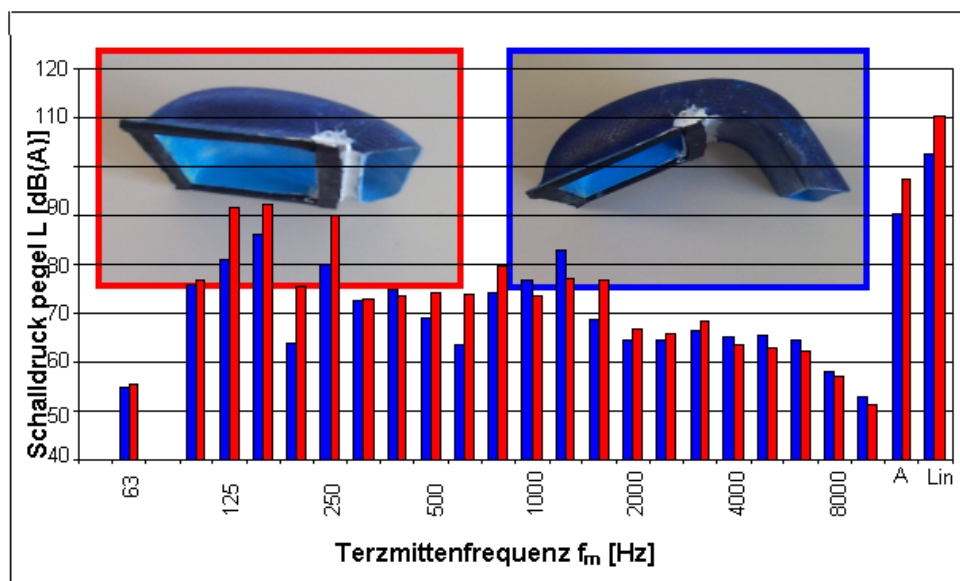


Bild 5: Spektrum im Maximum, Lufthutze kurz und halblang, ohne Tank, 4000 U/min, rechte Seite

6.3 Einfluss von Resonatoren

Wie bereits im Abschnitt 1 erwähnt, entsteht insbesondere bei Vollast in Ansaugsystemen eine stehende Welle im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 500 Hz. Da diese Eigenfrequenz nicht mit den Harmonischen der Motordrehzahl korreliert, wird sie meist als störend empfunden. Bei manchen Motorrädern ist sie ein dominierender Anteil im Vorbeifahrtspektrum. Helmholtzresonatoren sind zur Beeinflussung solcher Geräuschkomponente gut geeignet. Der Simulationsprüfstand bietet einerseits beste Möglichkeiten den Resonatoreinfluss auf die akustischen Eigenschaften des Ansaugsystems zu untersuchen. Andererseits können auch die strömungstechnischen Einflüsse des Resonators überprüft werden, da diese häufig erheblichen Auswirkungen auf Drehmoment- und Leistungscharakteristik des realen Motors haben. Bild 5 zeigt beispielhaft einen Vergleich eines Ansaugsystems mit und ohne Resonator.

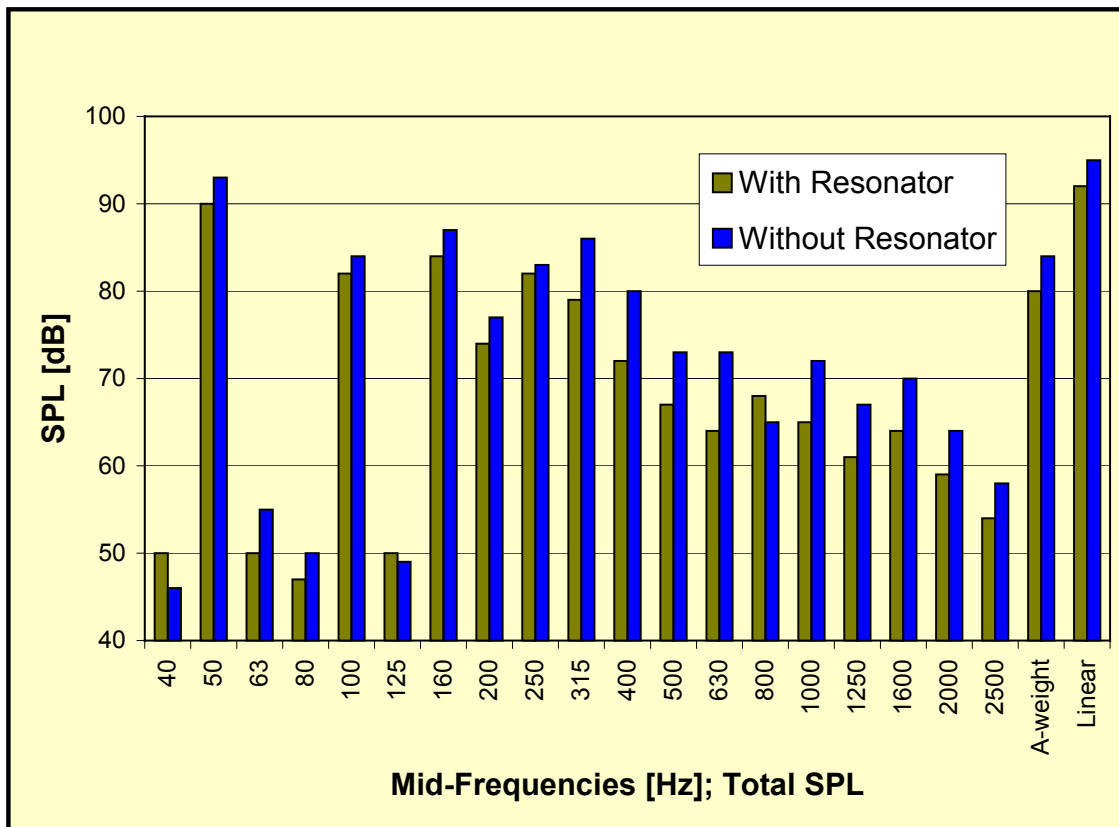


Bild 6: Resonatoreinfluss (ca. 350 Hz) auf die Airbox-Akustik (125cm³-Motor)

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Akustische Probleme an Fahrzeugen – auch an Motorrädern – werden meist erst zu einem späten Zeitpunkt der Produktentwicklung erkannt und können dann nur durch kosten- und zeitaufwendige Nacharbeit behoben werden. Aus diesem Grund suchen Hersteller von Fahrzeugen nach geeigneten Simulationsmethoden um auch bei kurzfristigen Änderungen die Auswirkungen auf das akustische Verhalten der Fahrzeuge zu prognostizieren

Die vorgestellten Beispiele für akustische Untersuchungen an Ansaugsystemen mit Air-Box zeigen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des Simulationsprüfstandes. Es existieren noch weitere hier nicht dargestellte Möglichkeiten:

- Messung der Schwingungseinleitung in den Tank infolge des „Pumpens“ der Air-Box im Rahmen von Fahrkomfort-Untersuchungen.
- Nutzung des Prüfstandes für Grundsatzuntersuchungen zur Auslegung von Abgasanlagen.
- Grundsatzuntersuchungen für aktive Maßnahmen zur Schallbeeinflussung im Ansaugsystem unter realitätsnahen Strömungsverhältnissen.
- Optimierung von Ansaugfiltern.

Zur Zeit wird an der Weiterentwicklung des Prüfstandes gearbeitet. Ziel ist, durch Minimierung der Leckverluste und der Schadvolumina den nutzbaren Frequenzbereich zu erweitern um auch höherfrequente Komponenten im Ansaugeräusch zu bewerten und damit eine noch bessere Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Simulationsprüfstand und realem Motorbetrieb zu erreichen.

8 Literatur

- [1] Steven, H; (RWTÜV).: Geräuschemission im realen Verkehr, Symposium „Macht Lärm Motorradfahren erst schön“, Berlin, Sept. 2002, Tagungsmaterial
- [2] Foken, W.; Grundke, D.: Möglichkeiten des Sound Engineering an Motorrädern, 1. Jenaer Akustik-Tag, Jena, April 2003, Tagungsmaterial
- [3] Pfeiffer G., Zuber Goos F., Seibel M., Volkert P., Baumgart H.: Moderne Test-Verfahren in der BMW Antriebsstrang-Entwicklung – Drei neue Prüfstände ATZ, Band99, Heft 7/8, Seite 446-454
- [4] J. M. Desantes, A. J. Torregrosa, A. Broatch: Experiments on Flow Noise Generation in Simple Exhaust Geometry, acta acustica - ACUSTICA, Vol. 87 (2001)46-55
- [5] Foken, W; Pohl, S., Bau, G.: Test Bench for the Acoustic Behaviour of Air-Boxes for Motorcycles, Small Engine Technology Conference, Kyoto/Japan 2002, SAE-Paper 2002-32-1812

Autor/ Author:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Foken

Westsächsische Hochschule Zwickau (FH)
Zwickau

Co-Autor/ Co-Author:

Dipl.-Ing. Sirko Pohl

Westsächsische Hochschule Zwickau (FH) / FES GmbH Fahrzeugentwicklung
Sachsen
Zwickau

Co-Autor/ Co-Author:

Dipl.-Ing. Guido Bau

MZ Engineering GmbH
Zschopau