

ROTATIONSANALYSE IM WINKELBEREICH

Dr.-Ing. Dejan Arsić

1. EINFÜHRUNG

Unerwünschte Geräusche werden durch Schwingungen oder Rotationen verursacht, die an einem bestimmten Punkt in eine Struktur eingebracht werden. Beide Phänomene breiten sich häufig in der gesamten Struktur aus und führen letztendlich zu einem unerwünschten Körper- oder Luftschall. Nachdem der Antriebsstrang eines Fahrzeugs die dominante Geräuschquelle in einem konventionellen Fahrzeug darstellt, müssen Bauteile wie die Kupplung, das Getriebe und die Kurbelwelle sorgfältig untersucht werden. Darüber hinaus wird angenommen, dass die rotierenden Teile selbst die Quelle der meisten Geräusche sind. Da jedes rotierende Element bereits selbst Geräusche und Schwingungen erzeugt und zudem alle Teile miteinander verbunden sind, werden diese Schwingungen auch an verbundene Strukturen weitergegeben. Obwohl die FFT an sich bereits eine leistungsfähige Analysemöglichkeit darstellt, wurde dieses Verfahren in den letzten Jahren um eine Vielzahl weiterer Analysen, insbesondere für drehende Systeme, erweitert. Diese erweiterten Verfahren sind bereits in handelsüblich verfügbare wie auch proprietäre Produkte integriert, die sich jedoch letzten Endes als "Blackbox" darstellen.

Dieses White Paper befasst sich mit den drei bekanntesten Verfahren: der Ordnungsanalyse, der Drehschwingungsanalyse und der Kurbelwinkelanalyse. Es enthält neben einer kurzen theoretischen Einleitung auch verschiedene Anwendungsmöglichkeiten.

Alle genannten Verfahren basieren auf der hochgenauen Erfassung der Drehzahl, für die eine Vielzahl von Sensoren eingesetzt werden können. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass sie nicht nur die Anzahl der Umdrehungen pro Minute erfassen (was sich leicht durch einen Impuls pro Umdrehung erreichen lässt), sondern, dass sie durch die Erfassung mehrerer Impulse pro Umdrehung (z. B. 360) jede Umdrehung genauer charakterisieren können. Somit kann das erfasste akustische Signal aus dem Zeitbereich in den Winkelbereich übertragen werden, was verschiedene Vorteile bietet.

Das dominante Geräusch in einem rotierenden System wird in der Regel durch eine Frequenz dargestellt, die mit der Drehzahl und deren Vielfachen korreliert. Zwar lassen sich diese sogenannten Ordnungen mithilfe der FFT-Blöcke als Basis recht einfach berechnen, doch geht dabei die Ordnungsaufösung bei sich schnell ändernder Drehzahl verloren. Dies wiederum lässt sich durch die sogenannte digitale Ordnungsanalyse kompensieren.

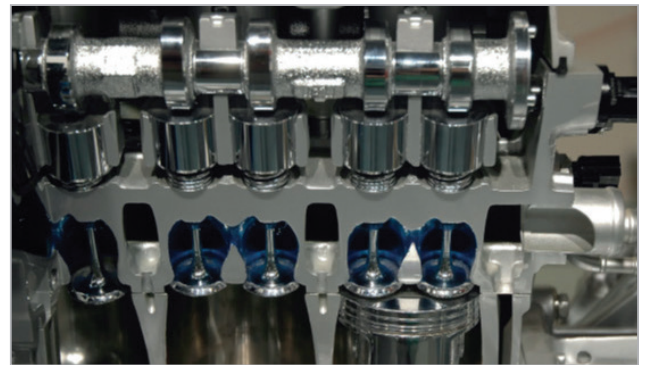


Abb. 1: Anwendungsbeispiel der Rotationsanalyse an den Kolben eines Motors

Außerdem bietet der Winkelbereich die Möglichkeit, die Bewegung eines rotierenden Teils zu beschreiben, die nicht notwendigerweise gleichmäßig sein muss. Zum einen ist möglicherweise die Drehung selbst nicht perfekt, zum anderen liegt unter Umständen eine Überlagerungsschwingung vor. Das Drehzahlsignal erscheint auf den ersten Blick absolut normal, doch mit der Umwandlung in den Winkelbereich kann die Winkelgeschwindigkeit weiter untersucht werden, um Drehschwingungen zu erkennen. Rotierende Systeme erzeugen zudem periodisch wiederkehrende Phänomene, die normalerweise nur an einer bestimmten Position des Systems auftreten, z. B. ein defektes Zahnrad oder eine Explosion im Zylinder eines Verbrennungsmotors. Wird die Analyse nicht anhand des gesamten Frequenzbands, sondern nur auf der Grundlage einer Umdrehung durchgeführt, kann die exakte Position mit der sogenannten Grad-Kurbelwinkel-Analyse bestimmt werden [1].

Ausgehend davon ist das White Paper wie folgt aufgebaut: Kapitel 2 beschreibt die Datenerfassung für die Rotationsanalyse, beginnend mit den einsetzbaren Sensoren und möglichen Alternativen, gefolgt von einer kurzen Abhandlung über die Bedeutung der Verarbeitung von Tacho-Rohsignalen. Der Standard in der Rotationsanalyse, die digitale Ordnungsanalyse, wird in Kapitel 3 vorgestellt und mit der Standard-FFT verglichen. Kapitel 4 befasst sich mit der Torsionsschwingung, die als Ungleichförmigkeit der Drehung betrachtet werden kann. Die Untersuchung regelmäßig auftretender Phänomene unter Anwendung der Grad-Kurbelwinkel-Analyse wird in Kapitel 5 erläutert. Kapitel 6 enthält eine kurze Zusammenfassung.

2. DATENERFASSUNG UND -VERARBEITUNG

Bei allen Rotationsanalyseverfahren spielen die Erfassung und die Verarbeitung der Drehzahldaten sowie weiterer zu analysierender Messgrößen eine entscheidende Rolle. Nur ein sauberes und einwandfreies Drehzahlsignal kann für die Analyse verwendet werden, da dieses maßgeblich die Ergebnisse beeinflusst. Der wichtigste Aspekt ist dabei die Genauigkeit der Drehzählerfassung. Angesichts der notwendigen Umwandlung der Pulse aus dem Zeitbereich in den Winkelbereich wird in der Regel eine hohe Auflösung (Impulse pro Umdrehung) benötigt. Das setzt wiederum ein Erfassungssystem mit einer hohen Abtastrate am Tachoeingang voraus, um auch alle Impulse zu erfassen. Aufgrund dieser Voraussetzung sind busgestützte digitale Drehzahlsignale, z. B. über den CANbus oder FlexRay™, wegen der möglichen Verzögerung und der niedrigen Genauigkeit nicht geeignet.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung und der möglichen Platzierung muss aus einer Vielzahl an Möglichkeiten der geeignete Sensor (z. B. induktionsbasiert oder optisch) ausgewählt werden. Optische Sensoren benötigen ein Schwarz-Weiß-Muster, das auf das rotierende Teil angelegt wird, sowie eine direkte Sichtverbindung. Induktionsgestützte Sensoren hingegen sind in der Lage, Veränderungen im Magnetfeld, die durch die Drehung des Zahnrads verursacht werden, zu erkennen. Beide Sensoren liefern in der Regel eine ausreichende Genauigkeit für die nachfolgenden Schritte.

Dennoch ist bei der Verarbeitung der Tachodaten sorgfältig vorzugehen. Da diese Daten die Grundlage der berechneten Drehzahl bilden, hat selbst die Ermittlung des Durchschnittswerts der ermittelten Drehzahl einen beträchtlichen Einfluss (siehe Abb. 2). Eine fehlerhafte Parametrisierung der Signalkonditionierung kann zu unerwünschten Nebeneffekten führen, z. B. einem unsauberen Drehzahlsignal mit schnellen Änderungen, während vielmehr ein gleichmäßiger Hochlauf wünschenswert wäre. Derartige Effekte können auch durch Fehler im erfassten Tachosignal verursacht werden. In den Tacho-Rohdaten sollten folgende Phänomene berücksichtigt werden:

- Füllung von Lücken im Tachosignal
- Eliminierung von Doppelpulsen
- Korrektur von Zahnrad-/Stoßfehlern

Entsprechende Korrekturalgorithmen sind für ein glattes und korrektes Drehzahlsignal notwendig.

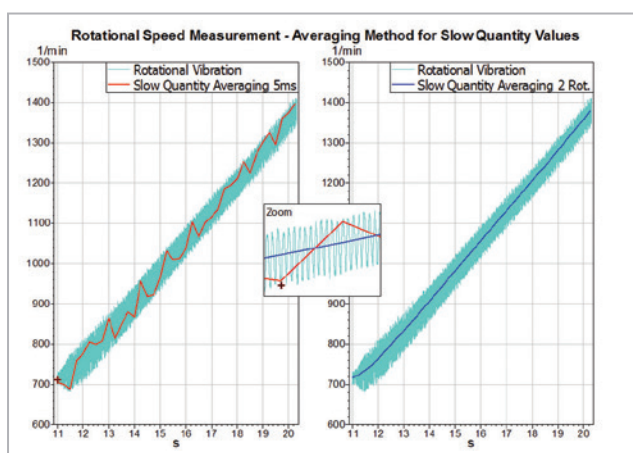


Abb. 2: Mögliche Fehler in der Rotationsgeschwindigkeit in Folge fehlerhafter Verarbeitung bei der Mittelung

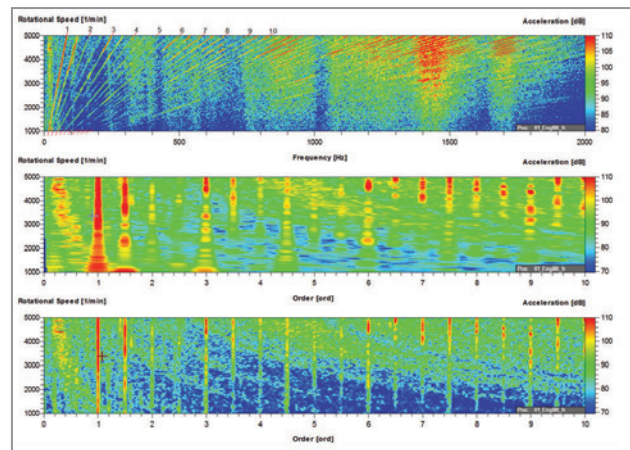


Abb. 3: Beispiel einer Ordnungsanalyse für den Motorhochlauf. Das obere Diagramm zeigt die FFT eines Signals mit der Drehzahl als Führungsgröße. Die Ordnungsanalyse kann direkt aus der FFT durchgeführt werden und resultiert in verschwommenen Linien, wie im mittleren Diagramm dargestellt. Durch digitales Resampling ergeben sich feinere Linien, die für eine detailliertere Analyse herangezogen werden können.

3. ORDNUNGSANALYSE

Die schnelle Fourier-Transformation (FFT, Fast Fourier Transformation) ist in der akustischen Analyse der Standard. Sie eignet sich perfekt für die Frequenzanalyse und ist auch ausreichend für die meisten weiteren Aufgaben. Dank verschiedener Einstellungen, z. B. Blockgröße, Überlappung, Mittelung, liefert sie präzise Informationen zu stationären und auch instationären Phänomenen. Wie bereits ausgeführt, stehen zahlreiche Motoren- und Getriebegetöse in direktem Zusammenhang mit rotierenden Komponenten. Die Frequenzen in Körper- oder Luftschallsignalen – die der jeweiligen Drehzahl oder deren Vielfachen entsprechen – werden als sogenannte Ordnungen betrachtet. In der Musik werden sie auch als Oberwellen bezeichnet. Die erste Ordnung stellt die tatsächliche Drehzahl dar, die zweite Ordnung ist die Drehzahl multipliziert mit zwei usw. Dementsprechend wird der Pegel für jede einzelne Ordnung berechnet. Mit der FFT als Basis für die Analyse ist es nun möglich, die Ordnung O entsprechend folgender Formel zu berechnen:

$$O = \frac{f}{n/60} \quad (1)$$

Dabei ist n die Drehzahl und f die aktuelle Frequenz. Abbildung 2 stellt den Prozess beim Hochlauf dar. Das obere Diagramm zeigt die FFT mit den dominanten Ordnungen, die durch die sich drehende Nockenwelle bei unterschiedlichen Drehzahlen erzeugt werden.

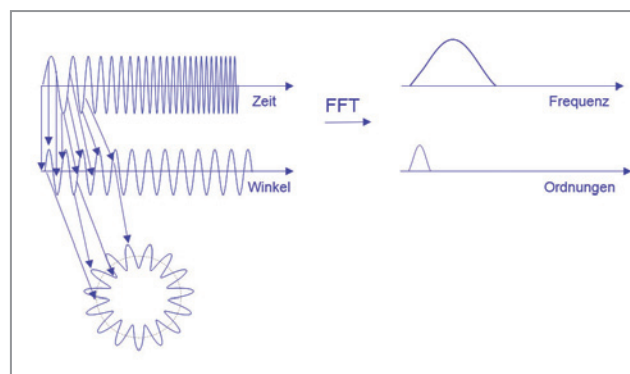


Abb. 4: Digitale Abtastraten-Konvertierung (Resampling) für die Ordnungsanalyse. Das im Zeitbereich erfasste Signal wird vor der FFT in den Winkelbereich übertragen. Daraus ergibt sich eine detailliertere Darstellung für die Ordnungsanalyse.

Mittels der relativ einfachen Formel lässt sich aber nur schwer eine genaue Korrelation zwischen der Frequenz und der Drehzahl herstellen. In der Regel würde man hierfür einen Korridor um die beobachtete Ordnung festlegen und dann versuchen, eine Durchschnittslinie zu erzeugen. Für langsame Drehzahländerungen ist diese Methode zumeist ausreichend. Wie aus dem mittleren Diagramm von Abbildung 2 ersichtlich ist, führt dies häufig bei schnelleren Drehzahländerungen zu einer schlechten Ordnungsauflösung. Daher ist ein Verfahren wünschenswert, das auch bei schneller Drehzahländerung eine exakte Ordnungsauflösung gewährleistet. Grundsätzlich soll dabei die Drehzahl genauer untersucht und das akustische Signal an dem Tachosignal ausgerichtet werden, das durch das System gemessen wurde. Hierfür kommt das sogenannte digitale Resampling (Abtastatenkonvertierung) ins Spiel. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wird das ursprüngliche Signal dabei in den Winkelbereich transformiert. Mittels einer hochgenauen Drehzahl und einer ausreichenden Anzahl an Impulsen pro Umdrehung kann eine exakte Korrelation zwischen Winkel und Zeit hergestellt werden. Auf diese Weise wird das Signal aus dem Zeitbereich in den Winkelbereich überführt und dabei innerhalb eines 360°-Arbeitsspiels exakt ausgerichtet. Wie bei dem ursprünglichen Signal im Zeitbereich wird nun eine einfache FFT durchgeführt. Das untere Diagramm in Abbildung 3 zeigt, dass das Ergebnis genauer als die FFT-basierte Berechnung ist.

4. DREHSCHWINGUNGEN

Drehschwingungen sind, vereinfacht ausgedrückt, Winkelschwingungen eines rotierenden Objekts im Antriebsstrang. Werden diese nicht kontrolliert, führen sie oft zu Defekten an Kupplungen und drehenden Wellen. Idealerweise ist das Drehmoment gleichmäßig und ausschließlich auf das rotierende Teil ausgelegt. In der Realität hingegen ist es ungleichmäßig und wirkt sich in der Ebene auf die Komponenten aus. Daher muss die Drehschwingung für jede Komponente berechnet werden. Voraussetzung dafür ist erneut ein sehr präzises Drehzahlsignal mit möglichst vielen Impulsen pro Umdrehung. Abbildung 5 zeigt die Bestimmung der Winkelgeschwindigkeiten. Mit dem bekannten regelmäßigen Abstand der Tachopulse des Tachosignals lässt sich die Winkelgeschwindigkeit durch Messung der Zeit dt zwischen zwei Impulsen einfach berechnen. Damit kann nun die Drehschwingung des rotierenden Teils bestimmt werden.

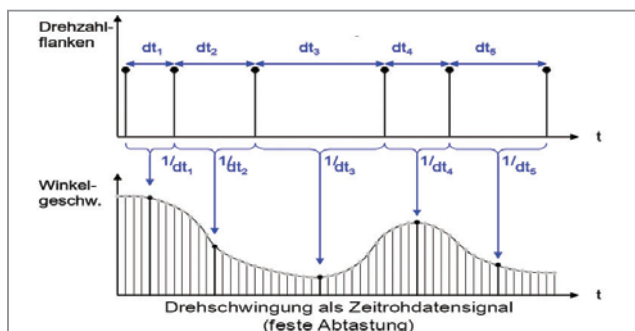


Abb. 5: Berechnung der Winkelgeschwindigkeit mithilfe eines hochpräzisen Tachosignals

Eine Beispielanwendung ist in Abbildung 6 dargestellt, bei der die Drehschwingung zwischen der Motorkupplung und der Kupplung gemessen wird. Oben links ist eine hohe Winkelgeschwindigkeit der 3. Ordnung erkennbar. Ziel ist es, einen Torsionsdämpfer zu entwickeln, der zumindest die Übertragung vom Motor auf die Kupplung vermeidet. Bei korrekter Auslegung des Torsionsdämpfers reduziert sich die Winkelgeschwindigkeit (siehe Abbildung 6 oben rechts). Beim Gangwechsel lassen sich aber weiterhin bestimmte Effekte beobachten. Unten links ist der Vorgang beim Drücken der Kupplung und Wechseln des Gangs dargestellt. Dabei wird ein kurzes zusätzliches Drehmoment der 1. und der 3. Ordnung erzeugt.

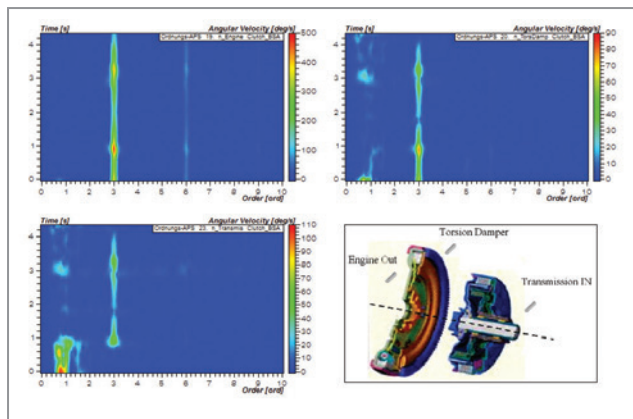


Abb. 6: Berechnete Drehschwingungen zwischen Motorkupplung und Kupplung mit zwei unterschiedlich ausgelegten Torsionsdämpfern

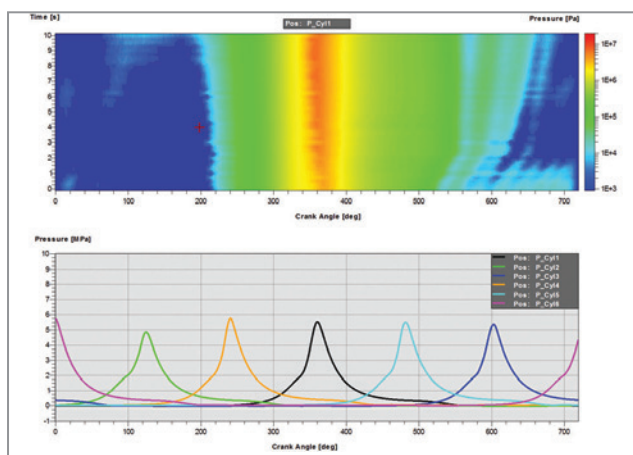


Abb. 7: Messung des Zylinderdrucks und Darstellung aller sechs Zylinder in einem Diagramm entsprechend der Winkelposition in einem Arbeitsspiel. Das 3D-Diagramm oben zeigt den Zylinderdruck beim Hochlauf

5. KURBELWINKELANALYSE

Rotierende Systeme erzeugen oftmals auch regelmäßig wiederkehrende Phänomene. Die Häufigkeit deren Auftretens steht in der Regel in direktem Zusammenhang mit der Drehgeschwindigkeit der Komponente. Die Periodizität wird durch regelmäßig wiederkehrende Ereignisse in einem oder mehreren Umdrehungen erzeugt, z. B. die Zündung in einem Zylinder oder Fehler an einem Zahnrad. Bei sich ändernder Drehzahl ist es daher schwierig, die tatsächliche Quelle mit einer normalen FFT zu ermitteln. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, das Signal nicht nur im Zeitbereich, sondern auch im Winkelbereich zu analysieren. Auf diese Weise lässt sich die genaue Position bestimmen, an der ein derartiges Ereignis auftritt. Neben einem hochauflösenden Drehzahlsignal, dessen Anzahl von Impulsen pro Umdrehung mindestens der gewünschten Winkelauflösung entsprechend muss, wird ein sogenanntes OT-Signal benötigt. Damit lassen sich der Beginn und das Ende eines Arbeitsspiels erkennen. In den meisten Fällen werden dafür zwei Signale mit 1 und 360 Impulsen pro Arbeitsspiel verwendet. Dabei stellt das Signal mit der niedrigen Auflösung die Ausgangsposition des Systems dar. Falls nur ein Drehzahlsignal erfasst werden kann, lässt sich der obere Totpunkt (OT) mithilfe einer Lücke innerhalb des Signals berechnen. Das Zeitsignal kann nun in den Winkelbereich übertragen werden. Im einfachsten Fall wird jeder erfasste Punkt aus den Zeitrodaten einem bestimmten Winkel zugeordnet. Dies lässt sich mit dem hochpräzisen Drehzahlsignal einfach bewerkstelligen. Für eine detailliertere Analyse wird das Signal mithilfe des OT-Signals in die einzelnen Arbeitsspiele unterteilt und anschließend die einzelnen Segmente in ein 3D-Diagramm übertragen.

Damit kann beispielsweise die Zündung in den einzelnen Zylindern eines Motors einer bestimmten Winkelposition der Nockenwelle zugeordnet werden (siehe Abbildung 7). Abbildung 8 veranschaulicht eine mögliche Anwendung. Mit einem Mikrofon wurde der Schalldruck motornah erfasst, um ein Klopfsignal zu untersuchen, das als Impuls in den Zeitrohdaten auftritt.

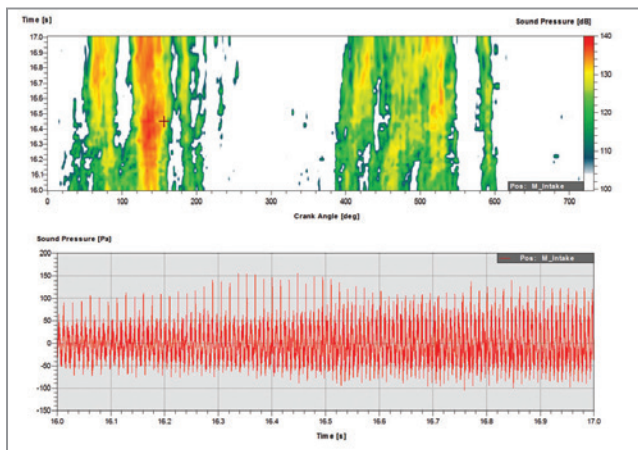


Abb. 8: Schalldruck eines Klopfsignals – untersucht mit der Grad-Kurbelwinkel-Analyse

Die Periodizität des Signals deutet darauf hin, dass die Impulse durch die drehenden Teile verursacht werden. Mittels der Grad-Kurbelwinkel-Analyse und nach Übertragung des Signals in den Winkelbereich konnte nachgewiesen werden, dass die Impulse an einer Position von ca. 140° des rotierenden Systems erzeugt werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem White Paper wurden drei verschiedene Ansätze der Rotationsanalyse für Körperschall- und Luftschallphänomene im Winkelbereich vorgestellt: die Ordnungsanalyse, die Drehschwingungsanalyse und die Grad-Kurbelwinkel-Analyse. Diese Analysen sind vollständig im NVH-Entwicklungsprozess von Fahrzeugen integriert. Die Grundlage bildet dabei nach wie vor die hochgenaue Erfassung der Drehzahl mit einer hohen Anzahl von Impulsen pro Umdrehung und Tachosignale, die mit einer hohen Abtastrate erfasst wurden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Einhaltung dieser Voraussetzungen von entscheidender Bedeutung ist und mit neuen, alternativen Antriebskonzepten weiter untersucht werden sollte. Insbesondere Start- und Stoppvorgänge von Motoren sind detailliert zu betrachten, da hier die Drehung der Nockenwelle unregelmäßig ist und häufig zu einem fehlerhaften Drehzahlsignal führt. Eine Nachbearbeitung des Signals ist hierbei sinnvoll, um die betreffenden Vorgänge sorgfältig untersuchen zu können.

7. REFERENZEN

[1] Dr. S. Wartini, B. Virnich.: Crank it up – Modern emerging powertrain noise analysis techniques allow more precise results in: Testing Technology International, May 2000, pp 28...30



Über uns

Müller-BBM VibroAkustik Systeme ist einer der führenden Anbieter für vibroakustische Messtechnik. Wir sind Know-how-Träger für die Interpretation dynamischer oder physikalischer Daten, insbesondere in den Bereichen NVH, Festigkeit und Komfort. Im Fokus unserer Systemkompetenz stehen innovative Lösungen, die sich nahtlos in gegebene Systemumfelder integrieren.

www.MuellerBBM-vas.de

Kontaktdaten

Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH

Robert-Koch-Straße 13, 82152 Planegg, Deutschland
Tel. +49-89-85602-400 • Fax +49-89-85602-444
E-Mail: sales@MuellerBBM-vas.de

Deutschland | BeNeLux & UK | China | Frankreich | Skandinavien | Südafrika | Südkorea | USA | Australien | Indien | Italien | Japan | Türkei

© 2016 Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH. PAK und PAK Müller-BBM sind eingetragene Marken der Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH. Alle anderen mit [™] oder [®] gekennzeichneten Bezeichnungen sind Marken oder eingetragene Marken der betreffenden Hersteller in den jeweiligen Ländern. Alle Angaben ohne Gewähr. Änderungen gemäß Produktentwicklung ohne Ankündigung vorbehalten. WP-RA1605G.