



WIR VERSTEHEN DIE ZEICHEN DER ZEIT  
KEEPING PACE WITH THE SIGNAL OF TIME

***Fachartikel***  
*in Quality Engineering 12/2005*  
*Industriemotoren*

# **Geräusche verraten Fehler**

Vibroakustische Motorenprüfung  
in der Produktion

Horst Jonuscheit, MEDAV GmbH, Uttenreuth

## Einführung

Verbrennungsmotoren sind wesentliche Quellen für Schwingungen und Geräusche in Maschinen und Fahrzeugen. Zunehmende Forderungen der Verbraucher nach leiseren und komfortableren Fahrzeugen oder schwingungsärmeren Maschinen werden von der Industrie aufgegriffen und umgesetzt.

Dass zwischenzeitlich der einfache Funktionstest von Motoren nicht mehr ausreichend ist, ist zumindest den innovativen Motorenbauern bekannt. Diese untersuchen mit Nachdruck Möglichkeiten, die Qualität ihrer Produkte zu steigern, Werksrückläufer zu vermeiden und kostengünstiger zu werden.

MEDAV beschäftigt sich seit mehreren Jahren intensiv mit der vibroakustischen Schwingungsanalyse in der Fahrzeugindustrie. Die End of Line-Prüfung von Diesel- und Ottomotoren für Personen- und Lastkraftwagen ist heute erweitert um die Schwingungsprüfung. Renommierten Marken wie AUDI, BMW, Daimler Chrysler, General Motors und Volkswagen setzen dabei auf MEDAV-Systeme.

Mit der Schwingungsanalyse gelingt es uns, aus wenigen Sekunden Messzeit eine Bewertung zu Montagefehlern, Beschädigungen und sonstigen Auffälligkeiten abzuleiten.

Gerade kritische Kunden bezeichnen uns als **Technologieführer**, weil sie in der erreichten Fehlererkennung und –diagnose sowie Prozesssicherheit (keine Pseudofehler) bei uns einen Vorsprung zum Wettbewerb sehen.

Unsere Systemtechnik erscheint uns auch zur Prüfung größerer Motoren und Gasturbinen als geeignet.

Die Möglichkeit, vollautomatisierte Prüfungen durchzuführen, wird durch unsere Systemtechnik und Verfahren gefördert.

## Beispiele zur Fehlererkennung

Die erste Frage unserer Kunden ist regelmäßig die, welche Fehler wir erkennen können. Einen Anhaltspunkt dazu liefert die folgende Tabelle.

- ✓ Unwuchten (Kurbelwelle, Ausgleichswelle)
- ✓ Fehler an Verzahnungen (Zahneingriff, -beschädigungen)
- ✓ Fehler an Kettentrieben (Kettenheulen, Zahnbeschädigungen, Kettenspanner)
- ✓ Fehler an Nockenwellen (Rattermarken, Beschädigungen an Laufflächen)
- ✓ Fehler im Ventiltrieb (atypisches Ventilklappern, Kipp-/ Schlepphebelgeräusche)
- ✓ Kolbengeräusche
- ✓ Fehler an Öl- und Hochdruckpumpen
- ✓ Fehlende Pleuellagerschalen
- ✓ Fehler an Turboladern (Unwuchten, Geräusche)

Allgemeines Kriterium für die Erkennbarkeit von Fehlern ist, dass sich die zu erkennenden Fehler und Auffälligkeiten im gemessenen Schwingungssignal abzeichnen. Einflüsse auf den Informationsgehalt im Signal sind vielfältig, u.a. bestimmt durch den ausgewählten Sensor oder die Messstelle. Nachdem **Prozesssicherheit** angestrebt wird, ist es erforderlich, dass sich der Fehler signifikant gegenüber den fehlerfreien Motoren darstellt. Hierzu helfen geeignete Analyseverfahren.

Bei den Motoren setzen wir sowohl Zeitsignal- als auch Frequenzanalyseverfahren ein. Aufgrund der Konstruktion der Motoren mit den rotierenden, periodisch arbeitenden Komponenten, erhält die Ordnungsanalyse als drehwinkelsynchrone Frequenzanalyse eine besondere Bedeutung. Unten wird dieses Verfahren kurz vorgestellt.

Bei der Prüfung von Industriemotoren sind zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen. Industriemotoren werden nicht zwingend im Minutentakt geprüft. Häufig werden diese Motoren über einige Stunden betrieben, um Fehler und Frühausfälle erkennen zu können. Diese Anforderungen können wir mit ebenfalls erprobten Methoden erfüllen.

## Ordnungsanalyse

Als Ordnungsanalyse wird die drehwinkelbezogene Frequenzanalyse bezeichnet. Ordnungen sind Frequenzkomponenten, die Vielfache der Bezugswelldrehzahl sind. Liefert die Kurbelwelle die Bezugsdrehzahl (1. Ordnung), so trägt beim Viertaktmotor die halb so schnell laufende Nockenwelle zur 0,5-ten Ordnung bei.

Wesentlich für die Anwendung der Ordnungsanalyse sind folgende Voraussetzungen und Potenziale:

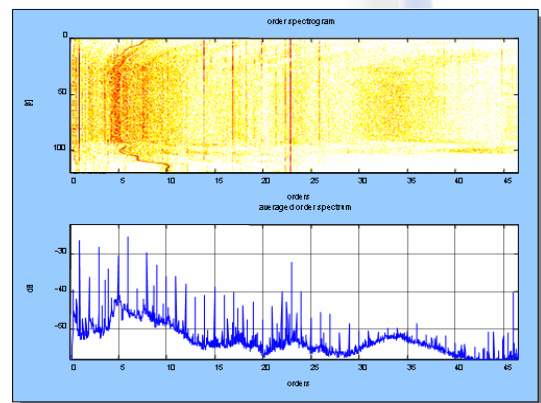
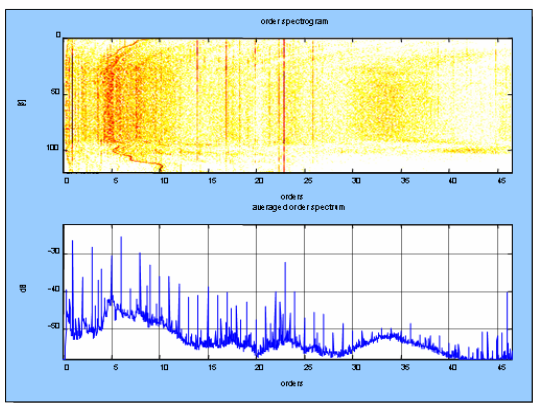
- Neben dem Schwingungssignal muss synchron die Drehzahl erfasst werden. Durch diese Zusatz-information können Einflüsse bedingt durch Drehzahländerungen und –schwankungen berücksichtigt werden.
- Kenntnisse zu der Motorenkinematik werden zur Parametrierung der Ordnungsauflösung sowie zur Interpretation der Ordnungslinien genutzt. Damit wird die Fehlerdiagnose nachhaltig gefördert.

Der Vorteil der Ordnungsanalyse gegenüber der traditionellen Frequenzanalyse mit FFT wird im folgenden Bild anschaulich.

Wir nutzen ein aufwendiges digitales Resampling-Verfahren für die Ordnungsanalyse. Damit können wir aus zeitäquidistant abgetasteten Schwingungssignalen die drehwinkelsynchronen Abtastwerte rekonstruieren und hohe Genauigkeitsanforderungen erfüllen.

Ordnungsspektren bilden für viele Gütemerkmale der Motorkomponenten die Grundlage. Für besondere Fehler werden in der Praxis spezialisierte Bewertungskriterien genutzt, um ein hohes Maß an Prozesssicherheit sowie möglichst eindeutige Fehlerdiagnose (Identifikation der auffälligen Komponente) zu erreichen.

Gegenüberstellung des gemittelten FFT-Spektrums (oben) und des Ordnungsspektrums (unten) bei einem Maschinenhochlauf. Links sind im Spektrogramm deutlich die drehzahlabhängigen Frequenzkomponenten zu erkennen, die als „Sägezahn“ sichtbar werden; das resultierende gemittelte Spektrum über den Hochlauf hat keine ausgeprägten Spitzen und ist nicht für eine Fehlerdiagnose verwendbar (dies gilt im Allgemeinen auch für kürzere gemittelte Zeitabschnitte bei veränderlicher Drehzahl!). Unten sind die entsprechenden Darstellungen für Ordnungsspektrum und gemitteltes Ordnungsspektrum angegeben. Ordnungen, die auf konkrete Motorenkomponenten zurückzuführen sind, sind deutlich ausgeprägt und deshalb für eine Fehlerdiagnose geeignet.



## **Systemtechnik**

Die technischen Anforderungen und personellen Möglichkeiten des Kunden bestimmen unseren Systemvorschlag. Dabei spannt sich der Bogen der Möglichkeiten vom Blackbox-System ANOVIS-lite bis zum Analysator ANOVIS.2. Obgleich sich die Systeme für den Betreiber recht unterschiedlich darstellen, bestehen mit allen Applikationen vergleichbare Möglichkeiten der Fehlererkennung: Die Anforderungen an den Betreiber zur Systemparametrierung und Auswertung sind unterschiedlich.

### **Der Messkanal**

ANOVIS-lite wird als intelligenter Sensor zur Schwingungsanalyse eingesetzt. Vorbestimmte Gütekenngößen z.B. für Zahneingriffe und Wellenunwuchten werden durch ANOVIS-lite berechnet und zur Auswertung an den Messrechner am Prüfstand übertragen (Toleranzgrenzen). ANOVIS-lite stellt sich für den Prüfstandsbetreiber als Messkanal dar, gleichwertig zu einem Drehmomentkanal. Der Betreiber nutzt seine ihm gut vertraute Messsoftware sowohl zur Einstellung der Grenzen für die einzelnen Kenngrößen als auch zur Visualisierung von Kurvenzügen und Ergebnissen.

Der Betreiber muss weder über vertiefende Kenntnisse in der Bedienung des ANOVIS-Systems noch zu den eingesetzten Verfahren verfügen.

Entscheidend für die Fehlererkennung ist die Definition der Kenngrößen. Darin liegt das wesentliche Know-how. Neben vertiefenden Kenntnissen zum Motor sind Kenntnisse in der Signalanalyse gefordert. MEDAV kann diese Aufgabe der Kenngrößendefinition übernehmen; nach einer angemessenen Schulung kann diese Aufgabe auch vom Werkspersonal übernommen werden. Dazu ist die Einarbeitung in die Offline-Analysesoftware des ANOVIS.2-Systems erforderlich.

### **Der Analysator**

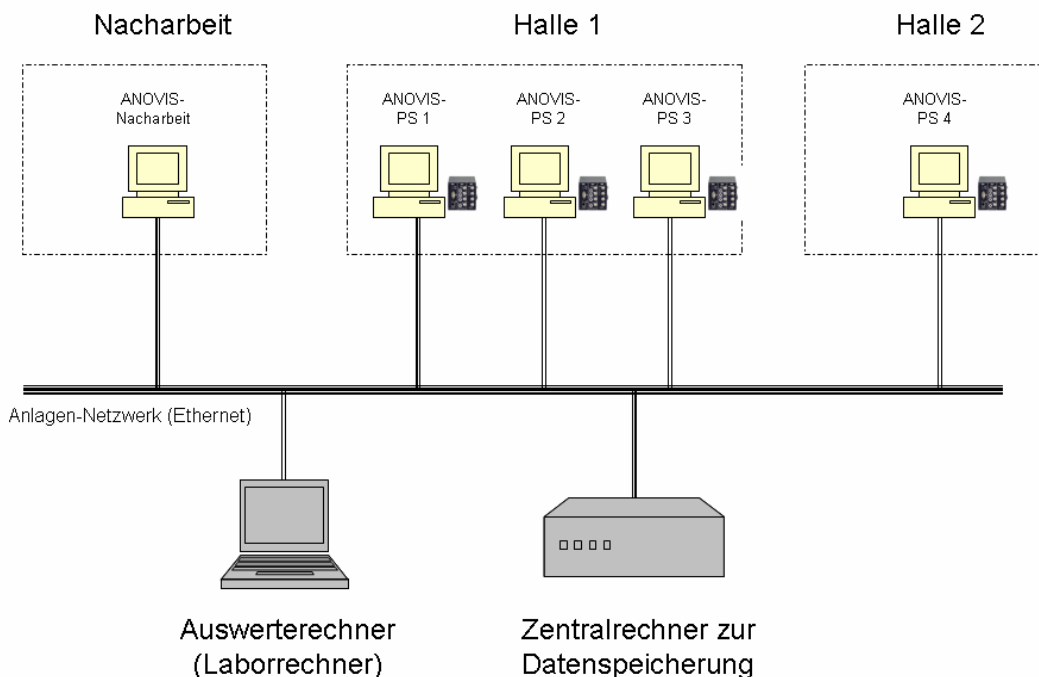
Der ANOVIS.2-Analysator bietet gegenüber ANOVIS-lite zusätzliche Funktionen. Die oben genannte Offline-Analysesoftware zur Einstellung von Kenngrößen ist ebenso enthalten wie die Möglichkeiten zur Visualisierung, die Bewertung der Kenngrößen (Entscheidung Gut – Fehler A – Fehler B - ...) und vor allem die mögliche Auffälligkeitsdiagnose mit automatischer Driftkompensation, kurz das Chamäleon-Verfahren.

## Chamäleon-Verfahren

Das **Chamäleon-Verfahren** (automatische Anpassung an die Umgebung = den Prozess) ist charakterisiert durch folgende Eigenschaften: Ausgehend von voreingestellten Güteigenschaften (Kenngrößen) werden die Grenzen für die einzelnen Merkmale automatisch ermittelt, in dem eine Serie von einigen zehn Motoren oder einer entsprechend langen Laufzeit eines Motors (bei Fertigung von Unikaten oder kleinen Stückzahlen) aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Aus dieser „Stichprobe“ wird automatisch der mittlere „Best-Motor“ bzw. „Best-Zustand“ ermittelt und entsprechende Auffälligkeitsgrenzen für die Güteigenschaften bestimmt. Nachdem das Schwingungsverhalten eines Motors nachhaltig von Drehzahl und Last beeinflusst wird, sind eventuell für die verschiedenen Drehzahl- und Laststufen unterschiedliche Auffälligkeitsgrenzen für die Güteigenschaften zu ermitteln; auch dies geschieht automatisch.

Auffälligkeitsgrenzen für die einzelnen Güteigenschaften können wahlweise starr oder auch adaptiv zur Prozessdrift eingestellt werden. Varianten sind möglich.



Systembeispiel. An den verschiedenen Prüfständen werden die Messdaten aufgezeichnet und ausgewertet; dazu sind eine ANOVIS-SRD zur Datenerfassung sowie ein (eventuell bereits vorhandener) PC erforderlich. Die Messdaten werden über das Anlagennetzwerk zu einem Zentralrechner übertragen und gespeichert (Traceability). Auf einem Laborrechner können offline die Messdaten analysiert ggf. angehört werden, Prüfvorschriften geändert und über das Netzwerk auf die Prüfstände überspielt werden. Am Nacharbeitsprüfstand werden Messergebnisse und –kurven dargestellt, Anweisungen gegeben.

### **Typische Systemrealisierung**

Das Systemkonzept von ANOVIS ist maßgeschneidert für die Anforderungen der Produktion und Qualitätssicherung. Unsere Kunden setzen häufig das preisgünstige ANOVIS-lite-System als Messkanal am Prüfstand ein. Messdaten und –kurven können gespeichert werden. Im QS-Labor werden Messdaten ausgewertet, Prüfvorschriften optimiert, Berichte erstellt. Dazu wird die ANOVIS-Offline-Software an einem Labor- bzw. Bürorechner genutzt.

Die ANOVIS-Systemtechnik unterstützt auch Nacharbeitsplätze. Die Darstellung von Messergebnissen, -kurven oder auch Arbeitsanweisungen und Anhören des Messsignals sind hilfreiche Systemfunktionen. Sofern keine Messsignalaufzeichnung erfolgen sollte, ist nur ein PC erforderlich.

ANOVIS lässt sich einfach in vorhandene Traceability-Strukturen einbinden.

### **Ausblick**

Schwingungsanalyse ist in der Motorenproduktion eingeführt. MEDAV bietet auf als Technologieführer auf der Basis ihrer ANOVIS-Systemtechnik Lösungen in der Fahrzeugindustrie an. Diese Systemtechnik und Verfahren im Verbund mit dem Know-how aus mehreren Jahren

Produktionserfahrung können vorteilhaft zur Lösung von Aufgabenstellungen für Industriemotoren (Dieselmotoren, Gasturbinen) eingesetzt werden. Damit gelingt es, gleichzeitig die Qualität zu erhöhen und die Prüfkosten zu reduzieren.

### **MEDAV GmbH**

GRÄFENBERGER STRASSE 32 - 34  
D-91080 UTTENREUTH

HOMBURGER PLATZ 3  
D-98693 ILMENAU

TELEFON: +49-9131-583-0

FAX: + 49-9131-583-1

E-MAIL: [info@medav.de](mailto:info@medav.de)

[www.medav.de](http://www.medav.de)

w708od.283