

Vibro-akustische Prüfung von Verbrennungsmotoren in der Produktion

Die vibro-akustische Prüfung von Verbrennungsmotoren in der Produktion hat sich in den vergangenen Jahren bei Motorenherstellern im Kalttest und Heißtest etabliert. Mit Körper- und Luftschallmessungen am Prüfstand lassen sich Montage- und Fertigungsfehler sowie Beschädigungen oder sonstige Auffälligkeiten von Komponenten sicher feststellen. Am Beispiel eines Daimler-Motorenwerks werden Erfolge der Körperschallprüfung vorgestellt. Anovis, das Schwingungsanalysesystem von Medav, wird kontinuierlich weiterentwickelt und für angrenzende Aufgaben wie für Fahrzeugmessungen und für Leistungstests angepasst.

1 Zielsetzungen

Die Zielsetzung der vibro-akustischen Prüfung in der Produktion konzentriert sich auf die Absicherung des „Null-Fehler“-Fertigungs- und Montageprozesses. Die vibro-akustische Prüfung bietet dem Montagewerk die Chance, Auffälligkeiten im Prozess zu erkennen sowie im Einzelfall Motoren mit Montage- und Fertigungsfehlern oder beschädigte Komponenten zu identifizieren; die Fehlerdiagnose wird dabei unterstützt. Die vibro-akustische Prüfung wird sowohl im Kalttest als auch im Heißtest erfolgreich eingesetzt.

2 Fehlererkennung

Zur prozesssicheren Fehlererkennung tragen unterschiedliche Randbedingungen bei. Vorauszusetzen ist, dass sich die Auffälligkeit am Prüfling im gemessenen Schwingungssignal auch abzeichnet. Dazu sind eventuell besondere Prüfregimes (Drehzahlprofil, Last etc.) einzustellen.

Das Sensorkonzept hat nachhaltig Einfluss auf die Erkennbarkeit von Fehlern. Werden nur „laute“, also energiereiche Fehler erwartet, dann kann nahezu jedes Sensorkonzept, sogar das prüfstandsseitige Aufzeichnen von Körperschall am Spannbacken, ausreichend sein. Schwierig wird es, wenn energiearme, „leise“ Fehler prozesssicher erkannt werden sollten. In diesem Fall sollte unmittelbar am Motor, idealerweise in räumlicher Nähe zur betref-

fenden Motorenkomponente, gemessen werden. Grund ist, dass die vom Fehler verursachte Energie sich in alle Richtungen ausbreitet und die Energiedichte pro Flächeneinheit kleiner wird, je weiter man mit dem Schwingungsaufnehmer weg von der idealen Messstelle ist.

Als Sensoren bewähren sich Laservibrometer und Tastspitzen mit Beschleunigungsaufnehmern; beide Konzepte sind für den prozesssicheren Einsatz geeignet und bewährt. Laservibrometer haben ihre Vorzüge in der hohen nutzbaren Signalbandbreite und bieten aufgrund der berührungslosen Messung auch die Möglichkeit, in verbauten Motorbereichen aus bequemem Arbeitsabstand mit dem Laserstrahl direkt auf der kritischen Komponente zu messen. Die Tastspitze hat Vorteile aufgrund ihres vergleichsweise niedrigen Preises sowie der geringeren Ansprüche an die Oberflächenbeschaffenheit der Messstelle. Eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Sensorkonzepte zeigt [1].

Zur Fehlererkennung finden Zeitbereichs- und Frequenzbereichsverfahren Anwendung. Überwiegend werden winkelsynchron gemittelte Signale ausgewertet. Die Ordnungsanalyse, mittels aufwendigem aber exaktem digitalem Resampling-Verfahren realisiert, hat wegen ihrer guten Nutzbarkeit für die Fehlerdiagnose besondere Bedeutung [2].

Das drehwinkelsynchron über das Arbeitsspiel (x-Achse: Kurbelwinkel 720°) gemittelte Zeitsignal wird genutzt, um grobe Fehler mit Timingzuordnung zu erkennen,

Bild 1. Mittels Ordnungsanalyse können



Bild 1: Bearbeitungsfehler an Kolben – oben: Beschleunigung über dem Drehwinkel der Kurbelwelle einschließlich Grenzwertkurven bei $\pm 10 \text{ m/s}^2$; unten: Grenzwertüberschreitungen

Die Autoren



Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm.
Horst Jonuscheit
ist Stellvertretender
Geschäftsführer der
MEDAV GmbH in Utten-
reuth.



Dipl.-Ing. Olaf Strama
ist Projektleiter bei der
MEDAV GmbH in Utten-
reuth.



Dipl.-Ing. (FH)
Karl-Anton Henger
leitet die Messtechnik bei
der JW Froehlich Maschi-
nenfabrik GmbH in Lein-
felden-Echterdingen.



Günther Nass
ist Qualitätsingenieur
im Motorenprüffeld
V-Motoren bei Daimler in
Stuttgart.

Tabelle 1: Fehlerbilder, die in ihrer jeweiligen Prüfstands- und Prozessumgebung prozesssicher erkannt werden

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

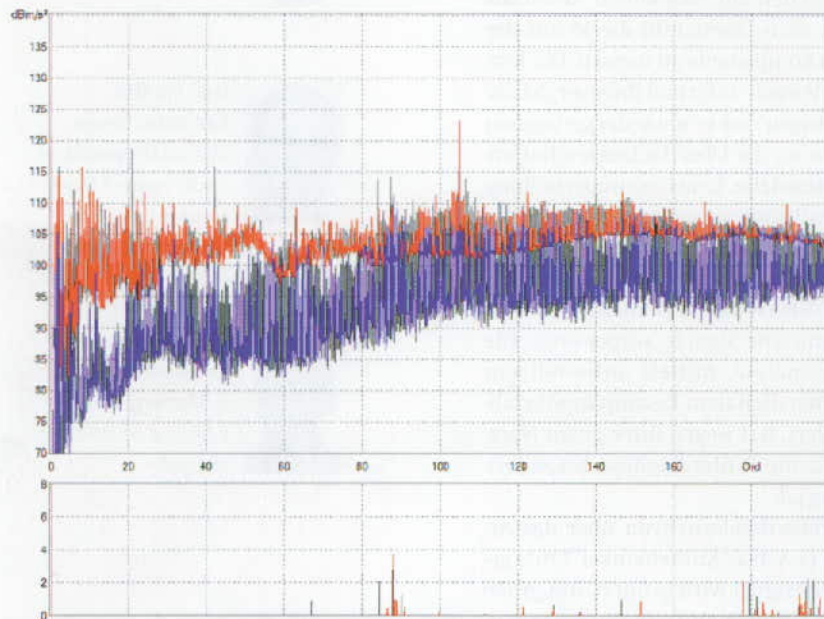
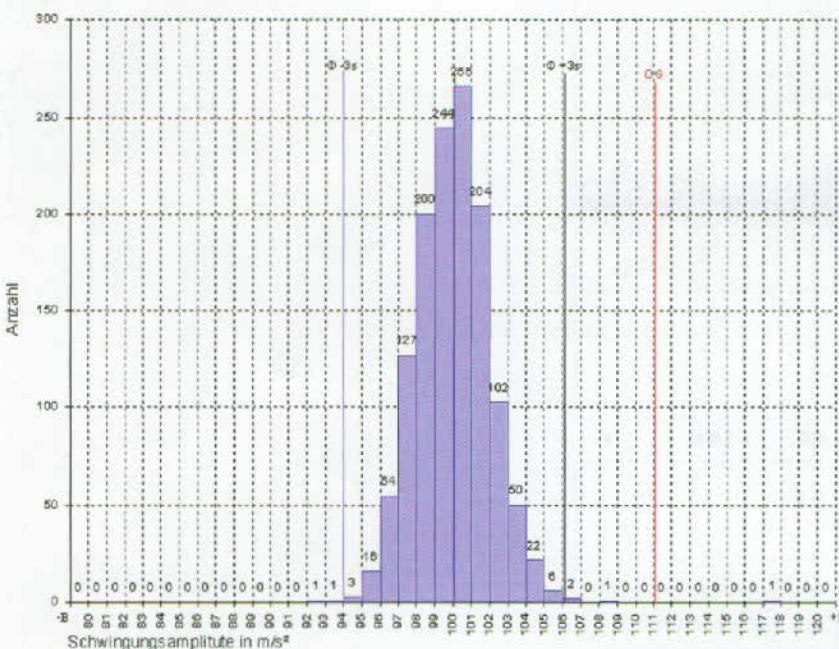


Bild 2: Fehlerhafte Montage eines Rollenschlepphebels bei einem V-Motor – oben: Beschleunigung über den Motorordnungen (obere Grenzwertkurve rot dargestellt); unten: Grenzwertüberschreitungen



„feinere“ Fehler zuverlässig erkannt werden, sofern die Fehler drehwinkelsynchron und periodisch wiederkehrend sind. **Bild 2.**

Aufgrund von Erfahrung ist es möglich, auf generalisierte, also auf von einer Motorvariante auf andere Motoren übertragbare Fehlerbilder und damit spezialisierte Gütemerkmale zurückgreifen. Dies reduziert die Justierarbeiten und garantiert gleichzeitig ein hohes Fehlererkennungspotenzial. Daneben werden weitere Gütemerkmale verwendet, um auch erstmalig auftretende Auffälligkeiten identifizieren zu können. **Tabelle 1** gibt einen Überblick über die Fehlerbilder, die heutzutage prozesssicher erkannt werden – die physikalisch bedingten Zusammenhänge zum Sensorkonzept und der Motorconstruction sowie der gegebenen Prozessstreuung dürfen dabei nicht unberücksichtigt bleiben.

Audi, BMW und Volkswagen engagieren sich gemeinsam mit JW Froehlich und Medav im Gemeinschaftsprojekt „Vibrotesting“ zur Weiterentwicklung des gesamten Kalttests, wobei der vibro-akustischen Prüfung die größte Bedeutung beigemessen wird. Spezielle Themen wie die Einbindung der Turboladerprüfung in den Kalttest, die sichere Erkennung nicht-drehwinkelsynchroner, transients oder einmaliger Auffälligkeiten wie Kolbensschlag oder Fremdkörper sind aktuell Gegenstand von Verfahrensentwicklungen. Auch Möglichkeiten zur Reduzierung des Einricht- und Wartungsaufwands werden untersucht. Das Projekt ist praxisorientiert und steht grundsätzlich weiteren Motorenbauern zur Teilnahme offen.

3 Systemtechnik

Hardware und Software von Anovis sind modular aufgebaut und werden jeweils für einzelne Applikationen konfiguriert. Neben den Prüfstandslösungen sind, auf der gleichen Systemplattform aufbauend, Analysatoren für die Entwicklungsabteilung (Ordnungsanalysator, Mobilsystem) oder Überwachungssysteme für Dauerlaufversuche verfügbar.

Bild 3: Statistik eines Gütemerkmals für Nockenwellenversteller (Schwingbeschleunigung der 70. Ordnung) – der Mittelwert des Merkmals liegt bei 100 m/s², die Standardabweichung bei 2 m/s²; bei einer oberen Grenze von 111 m/s² war ein Motor auffällig, der einen Merkmalswert von 118 m/s² aufwies; die Auffälligkeit wurde von der Nacharbeit als güterelevant bewertet

Tabelle 2: Übersicht zu den verfügbaren Analyse- und Auswerteverfahren in Anovis

Analysefunktionen	Ordnungsanalyse (max. 800 Ordnungen, min. 1/128 Ordnung Auflösung, max. 12.800 Ordnungslinien; winkelsynchrones Resampling; lineare und quadratische Interpolation der Resampling-Zeitpunkte), beliebige und virtuelle Bezugswellen FFT-Analyse (max. 32.768 Länge) Einzel-, Summen-, Harmonic- und Bereichspegel sowie deren Pegelverläufe (wahlweise über Ordnung bzw. Frequenz, Zeit, Drehzahl, Arbeitszyklus) Synchron gemitteltes Zeitsignal Einhüllende über Hilbert-Transformation Fensterfunktionen (Hann, Taylor, Rechteck, ...) Crestfaktor, Leistung, Mittelwert, Varianz, Streuung, Minimum, Maximum A-Bewertung, Differenziator (z.B. zur Umrechnung Schnelle in Beschleunigung) Geisterordnungsanalyse Schnellabschaltung bei groben Fehlern Schadensfrüherkennung zur Dauerlaufüberwachung Winkelerkennung (bei verfügbarem OT-Signal) Motoranalyse über Arbeitsspiel
Auswerte- und Klassifizierverfahren	Toleranzschlauch Chamäleon-Verfahren (adaptive Grenzwerte)
Darstellungsmodi	Wert, Linienzug, Sonagramm, Alarmfläche, Aussteueranzeige
Sonstige Funktionen	Signalfuss- und Viewerkonfiguration Zeitsignalspeicherung (zwischen 0 und 100 % der Signale, für unterschiedliche Güteklassen getrennt einstellbar) Triggerbedingungen (Messphasen mit START-STOP, Zeit-Trigger mit START + Dauer oder Drehzahl-Trigger) Kalibrierung (manuell oder automatisch) Audiodarstellung (WAV-Dateien) mitlaufende Marker gebundener Cursor, harmonischer Cursor, Hyperbelcursor Reportunterstützung MATLAB-Unterstützung ASAM-Schnittstelle (ATFX-Format) Definition unterschiedlicher Benutzerebenen Prozess- und Maschinenfähigkeit Umfassende Hilfstexte
Anforderungen Messrechner	PC mit folgender Mindestausstattung: 2,5 GHz CPU-Takt, 2 GByte RAM, 80 GByte Festplatte, Ethernet-Anschluss für Signalerfassungseinheit, Betriebssysteme: Windows™ XP Microsoft Office Paket zur Reporterstellung

3.1 Hardwarekonzept

Das Anovis-System schließt die abgesetzte Signalerfassungseinheit SRD (Signal Recording Device) und einen Mess-PC ein. Die erforderliche Anzahl von Signal- und Triggerkanälen kann auf Anovis-SRD modular zusammengestellt werden. Zusatzmodule bieten Schnittstellen zur Peripherie oder unterstützen kostengünstige, fest verdrahtete Lösungen zur Ressourcenteilung oder bei Variantenfertigung.

An die SRD werden die ausgewählten Schwingungssensoren und die Drehzahl-signale angeschlossen. Die Stromversorgung für ICP-Sensoren ist in SRD enthalten.

3.2 Softwarekonzept

Der für die jeweilige Aufgabe benötigte Funktionsumfang wird durch Verschalten geeigneter Signalverarbeitungsmodulare realisiert (Konfiguration). Konfigurationen werden in Setup-Dateien gespeichert. Beispiele für typische Funktionsumfänge sind:

- einkanale FFT-Analyse mit Auswertung ausgewählter Frequenzlinien über Schwellwerte
- zweikanalige Ordnungsanalyse mit Auswertung verschiedener Pegelverläufe über Grenzkurven, bezogen auf drei verschiedene Bezugswellen.

Es können beliebig viele Auswertungen parallel konfiguriert werden.



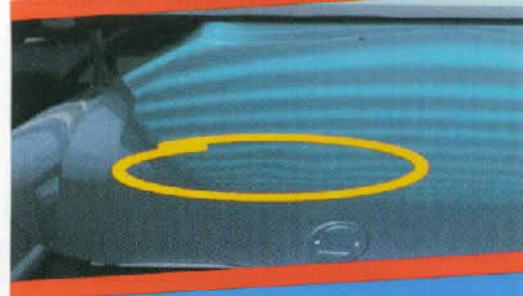
Oberflächeninspektion

Mehr Präzision - reflectCONTROL ist ein Bildverarbeitungssystem zur automatischen Identifikation, Lokalisierung und Klassifizierung von Defekten auf reflektierenden Oberflächen

Mikrometeregenaue Erfassung reflektierender Oberflächen in extrem kurzen Taktzeiten

Hochgenaue Messung von spiegelnden Präzisionsteilen und Lackoberflächen

Intelligente Klassifikation unterschiedlicher Defektklassen und -typen



www.micro-epsilon.de



MICRO-EPSILON

MICRO-EPSILON Messtechnik

94496 Ortenburg

Tel. 0 85 42/168-0 · info@micro-epsilon.de

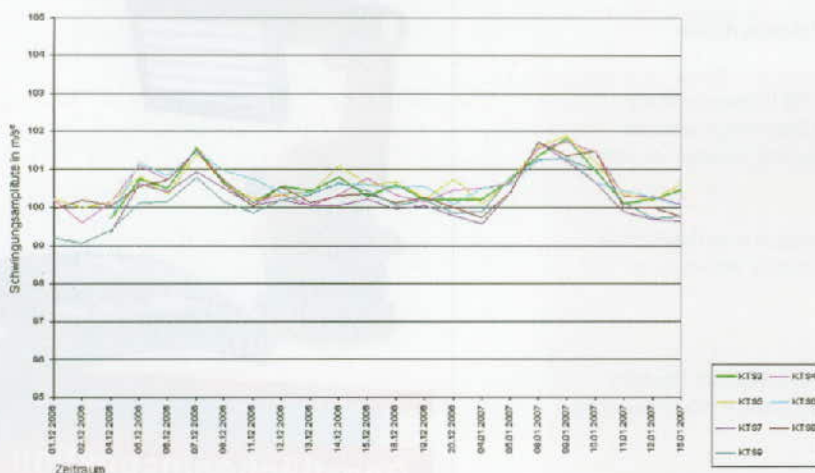


Bild 4: Trendverlauf des Gütemerkmals für Nockenwellenversteller (Schwingbeschleunigung der 70. Ordnung) über einen Monat, dargestellt getrennt nach Prüfstand – der qualitative Trendverlauf zwischen den Prüfständen ist gleichwertig und schwankt im betrachteten Zeitraum um etwa ± 1 m/s² um den Mittelwert

Die Einbindung von ANOVIS in eine automatisierte Umgebung erfolgt über die Softwareschnittstelle TeCo (Testbench Control). Das Protokoll zum Laden einer typabhängigen Prüfvorschrift, die Steuerung von Messphasen sowie die Übergabe von Messdaten werden mit dem Betreiber individuell vereinbart. Die physikalische Schnittstelle wird festgelegt. Typischer Weise erfolgt die Kommunikation über TCP/IP, UDP, RS232, SPS, Profibus oder sonstigen Schnittstellen, die standardmäßig von PCs unterstützt werden, oder über Fernsteuerkommandos.

Besondere Unterstützung zur Einrichtung von Grenzwerten und -kurven für einzelne Gütemerkmale erfährt der Anwender des Chamäleon-Verfahrens. Das Chamäleon-

on-Verfahren erleichtert die Einrichtung für Auffälligkeitsgrenzen durch Automatisierung.

Einen Überblick zu den verfügbaren Analysefunktionen, Schnittstellen und Systemanforderungen gibt **Tabelle 2**.

4 Ergebnisse aus einem Motorenwerk

In einem Daimler-Motorenwerk wurden in den Jahren 2003 bis 2005 insgesamt sieben Kaltteststände von JW Froehlich installiert. Jeder Prüfstand ist mit einem Anovis-System zuzüglich zwei Laservibrometer IVS-200 von Polytec zur Körperschallprüfung ausgestattet. Als PC wurde der Kalttest-PC genutzt. Für die Betreiber der Prüfstände

stehen Laborsysteme mit Offline-Analysemöglichkeiten zur Verfügung.

Integration und Inbetriebnahme der Körperschallprüfung können wegen der Verwendung von Standardprodukten und der Applikationserfahrung schnell abgeschlossen werden. Mit Anlaufen der Produktion werden am Prüfstand zügig Güte Merkmale für die Motoren sowie Auffälligkeitsgrenzen eingerichtet. Parallel erfolgt die Schulung der Systembetreuer zum Einrichten von Prüfvorschriften sowie zur Erstellung standardisierter Berichte.

Bild 3 zeigt ein Beispiel für ein Güte Merkmal mit einem auffälligen Motor. **Bild 4** zeigt den Trendverlauf dieses Merkmals über einen Zeitraum von anderthalb Monaten, getrennt nach Prüfstand. Die Messdaten bestehend aus Rohdaten und Messkurven werden über die JW Froehlich-Kalttestsoftware in der übergeordneten Datenbank gespeichert.

5 Ausblick

Umfangreiche Erfahrungen mit dem Anovis-System als prozesssichere Lösung für Heiß- und Kalttests sind für Otto- und Dieselmotoren, vom Dreizylinder- bis Achtzylindermotor, vorhanden. Seit 2006 werden auch Nutzfahrzeugmotoren mit Anovis-Systemen erfolgreich geprüft. Auf dieser Erfahrungsbasis aufbauend, wurde das Messsystem für die Motorenprüfung in den jeweiligen Prozessen optimiert und steht heute zusätzlich zu den Aufgaben in der Produktion auch für die Qualitätssicherung und Entwicklung zur Verfügung.

Literaturhinweise

- [1] Jonuscheit, H.; Strama, O.: Akustische Prüfung von Verbrennungsmotoren in der Produktion. In: MTZ 61 (2000), Nr. 11
- [2] Groppe, H.; Jonuscheit, H.; Strama, O.; Thomä, R.: Ordnungsanalyse. Messtechnik und Messsignalverarbeitung. Renningen: Expert, 1996

Das Wichtigste in Kürze

- Die vibro-akustische Prüfung bietet dem Montagewerk die Chance, Auffälligkeiten im Prozess zu erkennen sowie im Einzelfall Motoren mit Montage- und Fertigungsfehlern oder beschädigte Komponenten zu identifizieren.
- Als Sensoren kommen Laservibrometer und Tastspitzen mit Beschleunigungsaufnehmern zum Einsatz; für die Fehlererkennung finden Zeitbereichs- und Frequenzbereichsverfahren Anwendung.
- Audi, BMW und Volkswagen engagieren sich gemeinsam mit JW Froehlich und Medav im Gemeinschaftsprojekt "Vibrotesting" zur Weiterentwicklung des gesamten Kalttests.
- Die Einbindung der Turboladerprüfung in den Kalttest, die sichere Erkennung nicht-drehwinkelsynchroner, transients oder einmaliger Auffälligkeiten wie Kolbenschlag oder Fremdkörper sind aktuell Gegenstand von Verfahrensentwicklungen.
- Das Chamäleon-Verfahren ermöglicht automatisiert die Berechnung und wahlweise die Adaption von Auffälligkeitsgrenzen. Dadurch werden die Betreiber von Justierarbeiten entlastet.