

Akustische Prüfung von Aggregaten und Fahrzeugen im KFZ-Bereich

Dr. Thomas Lewien

DISCOM Industrielle Meß- und Prüftechnik GmbH, 37073 Göttingen

Übersicht

Die akustische Prüfung von mechanischen Baugruppen hat vor allem in der KFZ-Industrie vielfältige Anwendungen gefunden. Zum einen sollen Qualitätsaussagen reproduzierbar sein, zum anderen werden zunehmend auch die Möglichkeiten der Archivierung von Meßergebnissen wichtig. Die archivierten Daten dienen der statistischen Überprüfung des Produktionsprozesses und der Protokollierung der Fertigung nach ISO 9000-Gesichtspunkten.

Aufgaben

Ein akustisches Meßsystem muß eine Reihe von Forderungen erfüllen:

Algorithmen: Der akustische Analyseteil soll Algorithmen einsetzen, die an die jeweilige Aufgabe optimal angepaßt sind, um Fertigungsfehler feststellen und lokalisieren zu können. Hierzu fünf Anwendungsbeispiele:

Für *Getriebe* sind mehrkanalige, umdrehungssynchrone Ordnungsanalysen geeignet. Eine Beschädigungserkennung von *Zahnradern*, die empfindlich reagiert, benötigt Mechanismen, die in der Lage sind, leise periodische Anschlaggeräusche festzustellen, während gleichzeitig laute Zahneingriffsordnungen diese Geräusche überlagern. Bei der Prüfung von *PKW-Startern* können weitere Fehlerquellen durch die – in diesem Fall nicht akustische – Auswertung der Versorgungsspannungen aufgedeckt werden. Die Qualitätsanalyse von *Kegelrollen-Lagern* erfordert spezielle Verfahren, um die nicht stationären Bewegungsformen von Kegelrollen und Innenringen nachzuvollziehen. Für die *Innengeräuschprüfung von PKW's* in der Serienfertigung sind einerseits psychoakustische Parameter auszuwerten und andererseits die Meßgrößen zu ermitteln, die von den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen als Vorgaben spezifiziert werden. Hierzu zählen Terz- und Oktavbandmessungen sowie A-Pegel, die aus der ehemals analogen Meßtechnik erhalten geblieben sind.

Prozeßinterface: Die unterschiedlichen Anwendungen sind zwangsläufig mit vielfältigen Schnittstellen zu Maschinensteuerungen verbunden. Parallelschnittstellen, serielle Schnittstellen und diverse Übertragungsprotokolle geben einen bunten Mix, der eine monolithische Programmierung vor vornherein ausschließt.

Prüflingsverwaltung: In der Regel werden auf einer Fertigungslinie diverse Ausführungen eines Aggregats oder auch eines Gesamtfahrzeugs hergestellt. Das Prüfsystem muß sich schnell auf die unterschiedlichen Parameter wie Verzahnungsdaten von Getrieben oder Bauvarianten bei PKW's einstellen können. Ebenso wichtig ist die einfache Verwaltung der Grenzwerte und Meßparameter von teilweise Hunderten von Prüflingstypen.

Archivierung: Für die prozessbegleitende Datenspeicherung reicht es häufig, Meßgrößen einiger Tausend bis Zehntausend Aggregate aufzubewahren und einer statistischen Auswertung zuzuführen. Hier bietet Microsoft Access annehmbare Zugriffszeiten und erleichtert statistische Auswertungen durch die Office-Einbindung. Für die Langzeitarchivierung großer Datenmengen, z.B. der Abspeicherung der akustischen Daten einer 2-Jahres-PKW-Produktion kommen nur optimierte, speziell zugeschnittene Datenbanksysteme in Frage. Diese Daten fallen an Prüfstandsrechnern an und müssen auf einem zentralen Server gesammelt werden, um einen zentralen Datenbestand mit einfacher Backup-Möglichkeit zu gewährleisten.

Benutzerinterface: Das Benutzerinterface des Prüfsystems soll nur die in der speziellen Anwendung nötigen Funktionen darstellen, um den Benutzer nicht mit zusätzlicher Komplexität zu belasten. Sinnvoll ist auch eine darüber hinausgehende Einschränkung des Benutzerinterfaces je nach Bediener (Maschinenführer / Betreuer).

Stabilität: Trotz der geforderte Aufgabenvielfalt muß das Prüfsystem im Fertigungsbereich störungsfrei im Dauereinsatz funktionieren. Dies läßt sich nur mit einer Softwarestruktur erreichen, die einen vergleichsweise niedrigen Komplexitätsgrad hat.

Ein modulares Meßsystem

Die hohe Aufgabenvielfalt bei gleichzeitiger Einfachheit in Bedienung und Service führt auf ein strikt modulares Systemkonzept, das sich in einer objektorientierten Modulstruktur spiegelt. Das klassische "Programm" ist reduziert auf eine Anwendung, die Softwaremodule aus Bibliotheken herauszieht und dann erzeugt. Weiterhin stellt es Kommunikationsmittel zwischen den Modulen zur Verfügung, die den Signalfuß und die Kommandoabarbeitung standardisieren. Diese Grundstruktur steht nicht nur auf dem PC, sondern auch auf einem Multiprozessor-System zur Verfügung, das aus mehreren Signalprozessoren besteht.

Über den Inhalt der Module selbst weiß das Programm nichts. Diese können daher eine beliebige innere Struktur und Komplexität aufweisen. Nach außen wird diese Komplexität nicht sichtbar. Die Modulschnittstellen sind die Kommunikationsmittel der Programm-Grundstruktur.

Ein typisches Meßsystem im Fertigungseinsatz besteht aus ca. 150 Modulen. Es lassen sich jedoch auch einfache Analytoren z.B. für das Messen von Übertragungsfunktionen konfigurieren, die aus nur 20 Modulen bestehen.

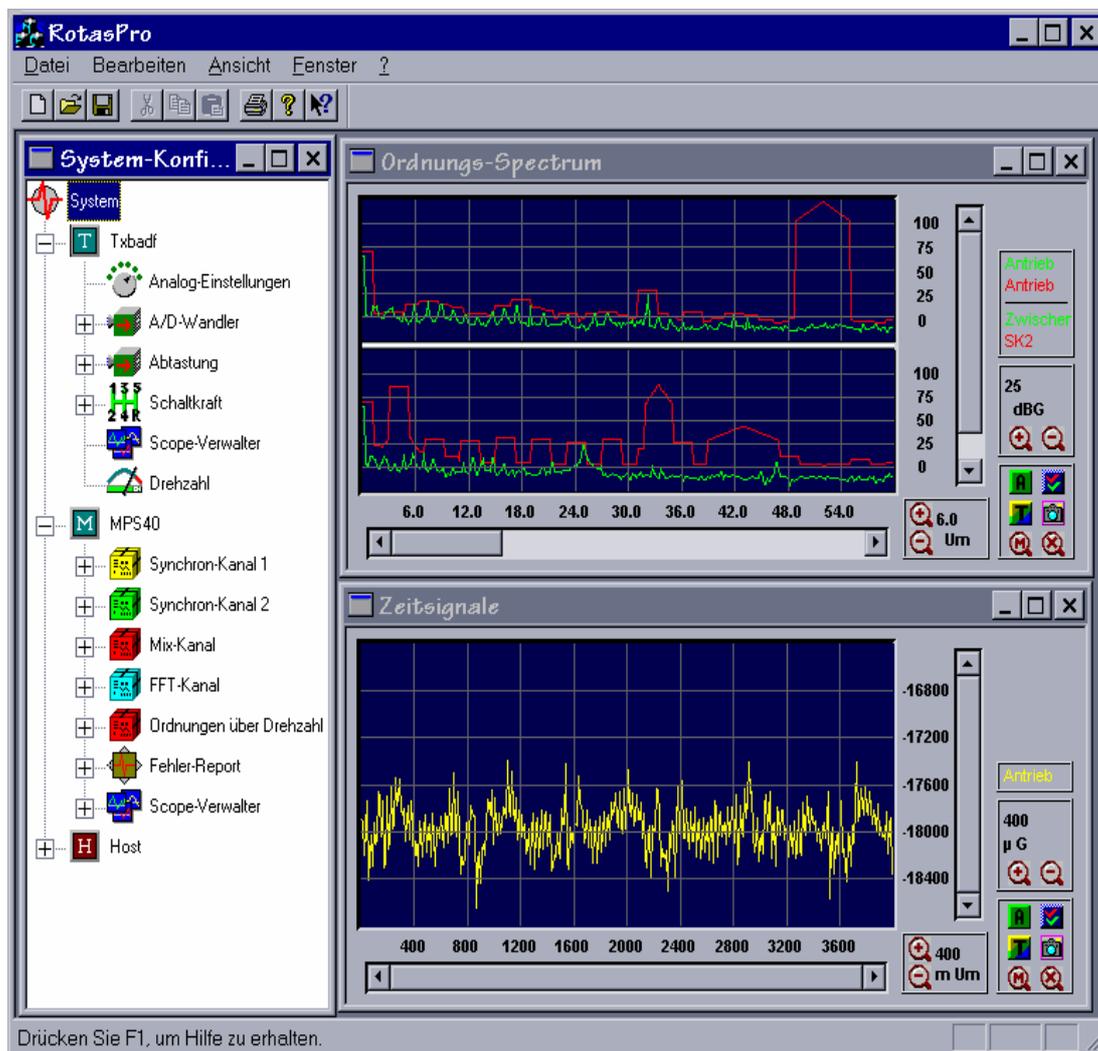


Abb. 1 Ansicht des modularen Meßsystems Rotas. Links die Systemkonfiguration, rechts Echtzeitanzeigen der Analyse.

Serienprüfung von KFZ-Getrieben

Eine Reihe von KFZ-Herstellern nimmt eine 100%-Prüfung der Getriebe auf Prüfständen vor, die die Einsatzbedingungen im Fahrzeug nachbilden: Es werden Drehzahlrampen unter Zug- und Schubbedingungen mit definierten Drehmomenten angefahren. Das Geräusch wird entweder über Körperschall oder über Luftschall aufgenommen und soll auf Baufehler untersucht werden. Bei Schaltgetrieben werden Kraft und Weg des Schalthebels zusätzlich gemessen, um fehlende Synchronringe oder schwergängige Schaltungen auffinden zu können.

Da die Geräuschkomponenten eines Getriebes im wesentlichen aus Harmonischen der Wellenumdrehung bestehen, ist das primäre Analyseverfahren die umdrehungssynchrone Ordnungsanalyse. Dieses Analyseverfahren liefert eine konstante Anzahl von Meßwerten für die Umdrehung einer Getriebewelle. Durch Aufmittlung aufeinanderfolgender Umdrehungen erzielt man den Effekt eines 'akustischen Stroboskops': Das Signal einer Welle, zu der

umdrehungssynchron gemessen wird, bleibt erhalten, die Signale anderer Wellen werden unterdrückt.

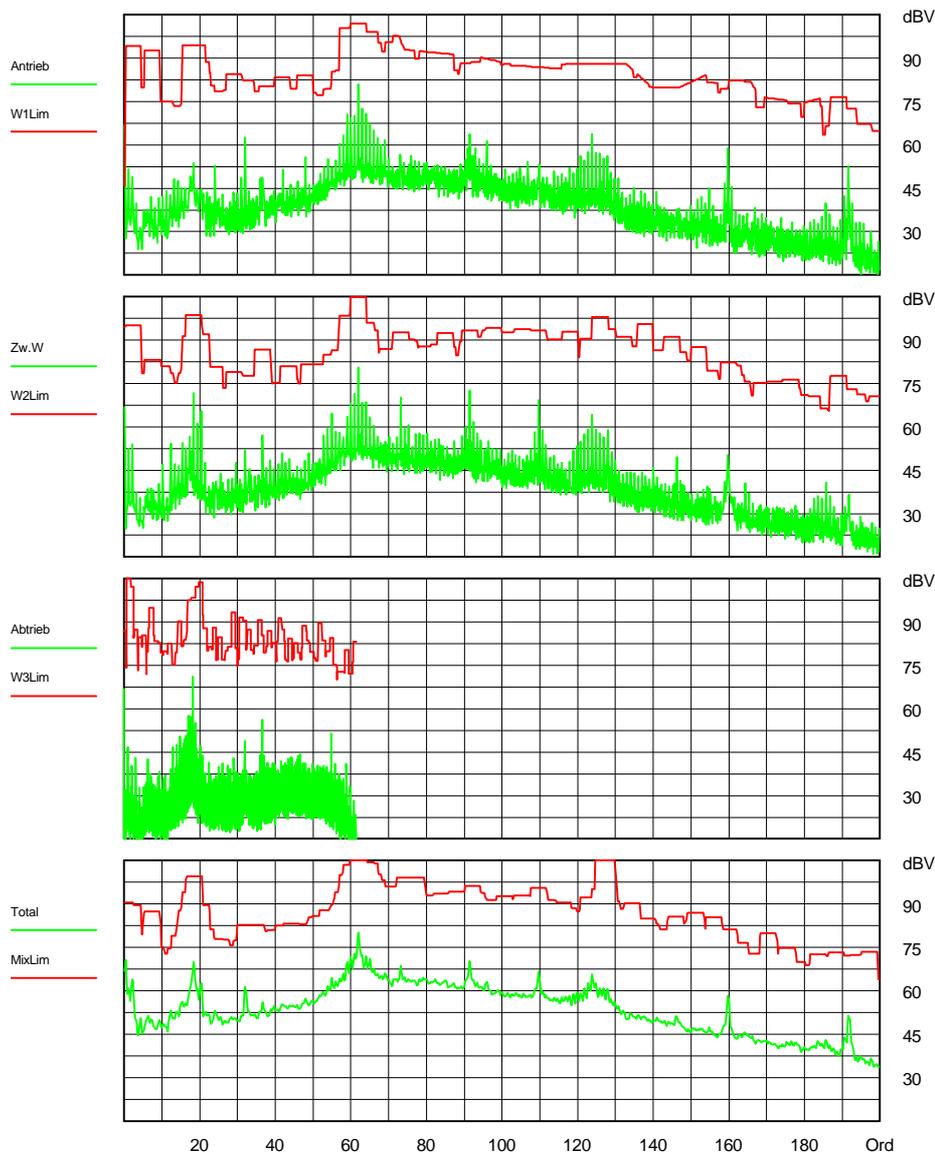


Abb. 2 zeigt die Ordnungsspektren eines Automatikgetriebes. Zu sehen ist die Trennung der Signalanteile in die Komponenten Antriebswelle, Zwischenwelle und Abtriebswelle. In der Darstellung sind die Ordnungen der einzelnen Kanäle auf die Antriebswelle als Referenz bezogen.

Die im Meßsystem arbeitenden Signalprozessoren vom Typ TMS-320C40 können je Prozessorkarte simultan drei dieser synchronen Ordnungskanäle rechnen. So lassen sich aus einem Schallsignal die Anteile von drei verschiedenen Getriebewellen separieren. Die Wellendrehzahlen werden aus den Übersetzungsverhältnissen im Getriebe von einer Referenzwelle abgeleitet. Zusätzlich zu den drei Synchronkanälen wird noch ein Ordnungskanal ohne Mittelung

im Zeitbereich verfolgt. Dieser sogenannte Mixkanal enthält auch Signalanteile, die zu keiner Welle synchron sind. Hierzu zählen Lagergeräusche.

Das manuelle Setzen von Grenzwerten und –kurven für die Bewertung ist mühsam und zeitaufwendig. Bei den vielen Übersetzungsvarianten und Getriebebauformen müssen von einer Betreuergruppe einige Hundert Getriebe-Typen mit Grenzwerten versorgt werden. Hier werden automatische Verfahren eingesetzt:

Das ROTAS-System verfügt daher über einen Lernmodus, in dem der Mittelwert und die Standardabweichung der Meßwerte anhand von fehlerfreien Teilen bestimmt werden. Diese Größen werden gespeichert und zur Bildung der Grenzwerte herangezogen. Da die Grenzwerte aus den statistischen Grundwerten jederzeit neu berechnet werden können, ist eine Feinabstimmung der Bewertungskriterien jederzeit möglich, ohne neu lernen zu müssen. Das Lernverhalten wird durch Minimums- und Maximumspolygone eingegrenzt, um ein Weglaufen der Grenzkurven im Lernprozess zu verhindern. Eine Besonderheit der Getriebebewertung liegt in der Konstruktion von hutförmigen Grenzkurven für die Zahneingriffsfrequenz und deren Harmonischer. Diese Hüte werden vom System, das die Zähnezahlen der Räder kennt, automatisch auf die richtigen Ordnung gesetzt. Man gibt in einer Datenbank nur die Amplitude und Harmonische des Geräuschanteils an.

Die Anzeige von Fehlern erfolgt dann über Klartextmeldungen. Fehlercodes werden über eine Datenbank mit Ordnungen oder Einzelmeßwerten wie Crest- oder RMS-Werten verknüpft. Dabei werden die Fehlermeldungen hierarchisch organisiert: Crest-Fehler unterdrücken zum Beispiel spektrale Fehler in dergleichen Prüfstufe, da Beschädigungen breitbandige spektrale Überschreitungen hervorrufen, die keine neuen Informationen liefern.

Typ 72 Palette 36 09.Jun'98 09:14:49 Schaltgetriebe V4.7 wird wiederholt						
Code	Fehlertext	Gang	Ist Grenz	Mw	E	O/Tp Kx
310	Beschaedigung Antrieb 5. Gang /Zug	3-Z	2.2/ 1.0/	0.0		Crest SK1
8	2.-Gang Abtrieb laut /Schub	2-S	106.1/104.3/	85.3 dB		36.00 SK2
8	2.-Gang Antrieb laut /Schub	2-S	111.7/103.3/	84.6 dB		17.00 SK1
100	Rundlauffehler Triebsetzantrieb	4-Z	116.2/104.0/	14.3 dB		9.50 SK2

Abb. 3 zeigt die Klartext-Ausgabe der Geräuschanalyse

Abrollprüfung von Getriebezahnrädern

Als Meßverfahren wurde die umdrehungssynchrone Erfassung des Körperschallsignals angewandt. Das Meßverfahren ist - wie oben beschrieben - in der Lage, die Signalanteile von Wellen mit unterschiedlichen Drehzahlen aufzuspalten und getrennt zu bewerten. Bei der vorliegenden Abrollprüfung können so Unregelmäßigkeiten auf dem Meisterrad und auf dem Prüfling getrennt werden. Das Verfahren liefert ein akustisch gewonnenes Abbild der

abwälzenden Oberfläche und ist auf die Weise leicht interpretierbar: Das Abwälzen der einzelnen Zähne, Amplitudenmodulationen durch Exzentrizitäten sowie eventuell überlagerte Beschädigungen sind deutlich zu erkennen (Abb.4).

Sollen Beschädigungen gefunden werden, die einen geringeren Pegel als das Zahneingriffsgeräusch haben, so muß zunächst dieses Zahngeräusch unterdrückt werden. Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt, das sich die phasenstarre Ordnungsanalyse zunutze macht:

Von jedem Zahn wird der Mittelwert der drei rechts- und der drei linksliegenden Zähne abgezogen. Damit werden nicht nur die Zahneingriffsharmonische und deren Oberwellen beseitigt, es wird auch eine eventuell vorhandene Exzentrizität des Prüfdorns oder des Zahnrades herausgerechnet: Bei 25-35 Zähnen auf den Rädern liegt der zur Mittelung herangezogene Zahnbereich von +/- drei Zähnen im selben Umdrehungsquartel und wird durch Exzentrizitäten in der Amplitude auf annähernd gleiche Weise beeinflusst.

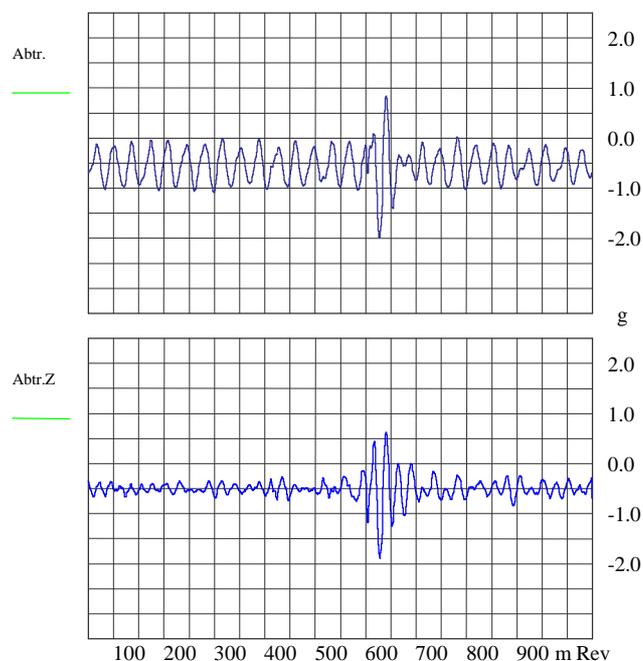


Abb. 4 Umdrehungssynchrones Abrollsignal einer Zahnradprüfung. Oben Original-Signal, unten Signal nach Entfernen der Zahneingriffsgeräusche.

Das Verfahren kann so die Beschädigungen auf einer „geglätteten“ Zahnradoberfläche darstellen und wird gegenüber Beschädigungen so empfindlich wie ein abhörender menschlicher Prüfer. Darüber hinaus kann noch die Herkunftswelle festgestellt werden, was menschlichen Prüfern aufgrund der ähnlichen Periodizitäten von An- und Abtriebswelle üblicherweise nicht gelingt. Abb. 2 zeigt das deutliche Heraustreten der Beschädigung.

Innengeräuschprüfung in der PKW-Serienprüfung

In den Prüfablauf der PKW-Einfahrprüfung ist eine akustische Bewertung des Innengeräuschs integriert. Auf einem Rollenprüfstand wird während einer Beschleunigungs- und anschließenden Verzögerungsfahrt das Innengeräusch mit einem Meßmikrofon in der Nähe des Fahrerohrs aufgenommen und zusammen mit der Motordrehzahl online ausgewertet.

Die akustischen Analysen sollen einerseits eine psychoakustisch relevante Bewertung des Fahrzeuggeräuschs ermöglichen und andererseits zur Aufdeckung von Produktionsfehlern beitragen. Hierzu werden dBA-Pegel, Motorordnung sowie Terz- und Oktavbänder bis zu 1 kHz über der Drehzahl aufgenommen und bewertet. Die Begrenzung auf den unteren Frequenzbereich ist aufgrund der vielen Eigenresonanzen im Innenraum des Fahrzeugs bewußt gewählt worden.

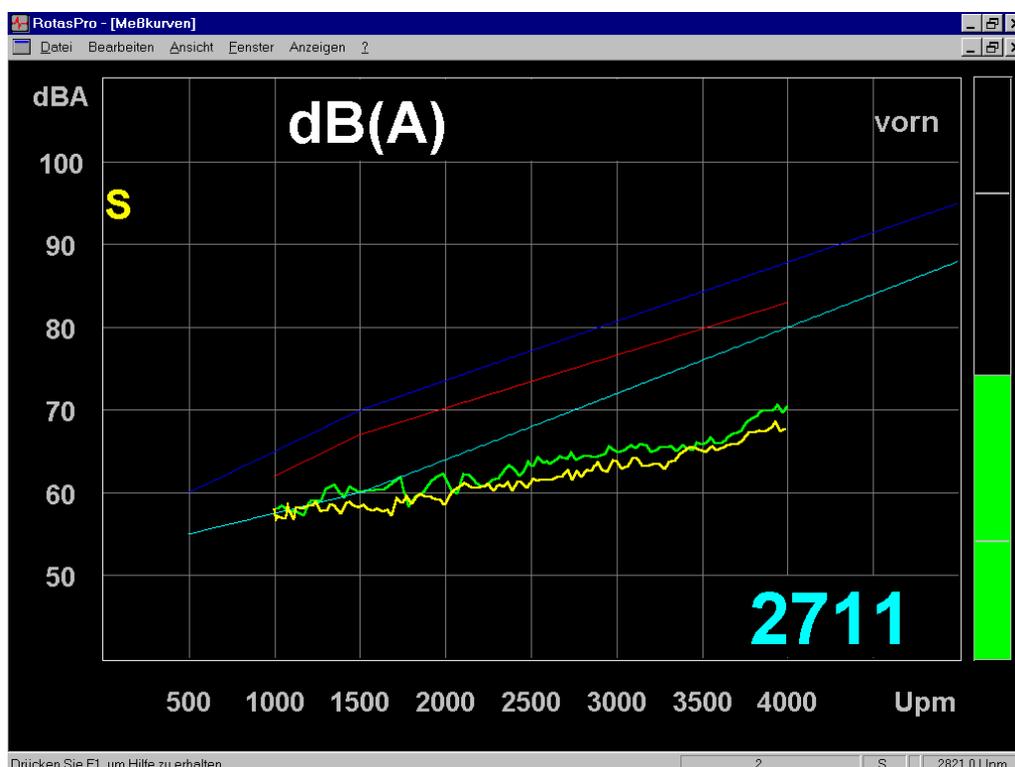


Abb. 5 dBA-Pegelverläufe für Zug- und Schubmessung. Der Balken auf der rechten Seite gibt dem Fahrer während der Zugmessung eine Information über die benötigte gleichartige Beschleunigung.

Diese Meßgrößen werden mit drehzahlabhängigen Grenzkurven verglichen, die fahrzeugabhängig vorgegeben werden. Da auf einer Produktionslinie eine Vielzahl von Modellvarianten produziert und geprüft werden müssen, die sich in akustisch relevanten Ausstattungsmerkmalen wie Motorisierung, Karosserieform, Links- oder Rechtslenker, Klimaanlage, Getriebeart, Bereifung und ähnlichem mehr unterscheiden, kommt der Klassifizierung des Fahrzeugs und der Verwaltung passender Prüfvorschriften erhebliche Bedeutung zu:

Als erstes muß das Fahrzeug aufgrund seiner Seriennummer identifiziert werden. Hierzu erhält das Akustiksystem vom Montageleitsystem für jedes gebaute Fahrzeug einen Datensatz, der sämtliche Komponenten dieser Bauvariante enthält. In einem vom Benutzer vorgebbaren

Entscheidungsbaum wird hieraus eine Modellklasse mit dazugehöriger Prüfvorschrift extrahiert. Diese Prüfvorschrift enthält sowohl Parameter des Prüfverfahrens (Start- und Stopdrehzahl, notwendige Beschleunigung während der Prüfung), Analyseverfahren (welche Motorordnung, welche Terz- oder Oktavbänder) wie auch die zur Prüfung verwendeten Grenzkurven. Die Prüfvorschriften selbst werden in einer zentralen Access-Datenbank gepflegt und auf die einzelnen Prüfrechner verteilt.

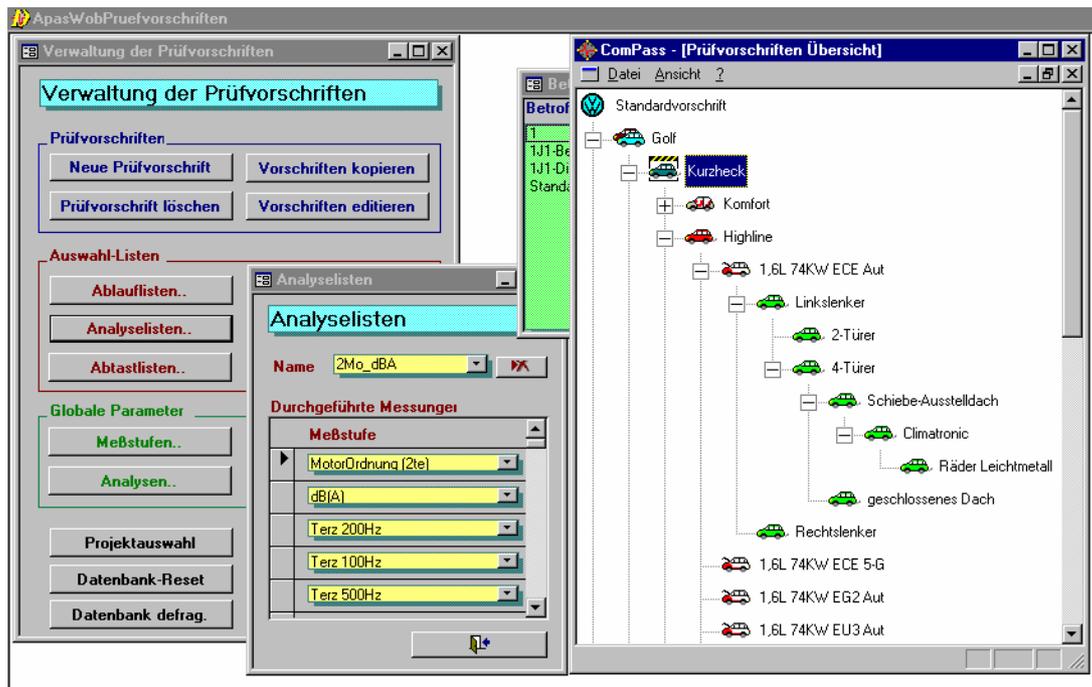


Abb. 6 Zuordnung von Prüfvorschriften zu Modellvarianten in der Innengeräuschprüfung

Um in die Prüfvorschriften sinnvolle Grenzkurven und –werte eintragen zu können, ist eine statistische Auswertung der in der Serienmessung ermittelten Meßwerte unerlässlich. Zu diesem Zweck werden die akustischen Daten sowie die Modellparameter sämtlicher während eines Zweijahreszeitraums gemessenen Fahrzeuge in eine Datenbank eingetragen. Diese wird dann ca. 1 Million Akustik- und Fahrzeugdaten enthalten. Aus dieser zentralen Datensammlung können bestimmte Fahrzeugklassen ausgewählt werden (wie etwa: alle Dieselmotor-getriebenen Fahrzeuge mit Klimaanlage im Monat Juli) und z.B. deren Verteilungsfunktionen für die zweite Motorordnung über der Drehzahl ermittelt und dargestellt werden.

Prüfung von PKW-Startern

In der Serienprüfung von Startern werden die Starter bei Leerlaufdrehzahl (15000 – 22000 U/min des Ankers) geprüft. Es wird einerseits der Luftschall betrachtet und andererseits die Spannung am Starter analysiert.

Der A-bewertete Schallpegel wird mit kundenabhängigen Grenzen verglichen und zur Selektion verwendet. Hohe A-Pegel haben häufig ihre Ursache in Ankerunwuchten. Eine wünschenswerte Ordnungsanalyse wird bisher durch das Fehlen eines robusten Verfahrens zur Drehzahlerfassung erschwert. Beim anderen Verfahren wird die gleichzeitig erfaßte Leerlaufspannung am Starter auf

Spannungsspitzen untersucht, die durch Bürstenfeuer hervorgerufen werden. Häufige und hohe Spannungsspitzen können die Bordcomputer von Fahrzeugen während des Anlaufvorgangs zum Absturz bringen und sind daher bei entsprechend anfälligen Elektroniken zu vermeiden.

Die Meßdaten von ca. 200 verschiedenen Startertypen werden in Access-Datenbanken gespeichert. Da in einer Schicht mehrere tausend Starter geprüft werden, stehen statistisch relevante Aussagen für die unterschiedlichen Typen zur Verfügung. Sie werden für die Qualitätssicherung herangezogen und geben den Entwicklungsabteilungen wichtige Hinweise für die Konstruktion geräuscharmer Starter.

Prüfung von Kegelrollenlagern

Die akustische Prüfung von Lagern wird bereits seit Jahren angewandt. Mit den eingesetzten Spektralverfahren ist zwar eine Gut/Schlecht-Klassifizierung bei Welligkeiten möglich, die Erkennung von Hiebmarken ist jedoch bereits problematisch. Eine Zuordnung von Fehlern zu den Baugruppen des Lagers ist aufgrund rein spektraler Eigenschaften wenig erfolgreich gewesen, da prinzipiell alle Welligkeiten auf den Lagerbauteilen möglich sind und die Transformation von Welligkeiten in Frequenzen von diversen Parametern der Lagergeometrie abhängt.

Im Fall von Kegelrollenlagern sind die Drehzahlen der Lagerbestandteile wie Innenring, Kegelrollen, Käfig und Außenring jedoch konstante Verhältnisse der Wellendrehzahl, da die Kegelrollen ohne Schlupf zwischen Innen- und Außenring abrollen. Bei Kugellagern ist dies aufgrund des variablen Wegs der Kugeln auf den Laufflächen nur annähernd der Fall. Für Kegelrollenlager läßt sich also die Bewegung vorhersagen: eine modifizierte synchrone Ordnungsanalyse kann aus dem Zeitsignal den Anteil zurückgewinnen, der vom Innenring stammt und – getrennt davon - den Anteil, der von den Kegelrollen stammt. Ist dies einmal gelungen, so ist die Erkennung von Fehlern stark vereinfacht.

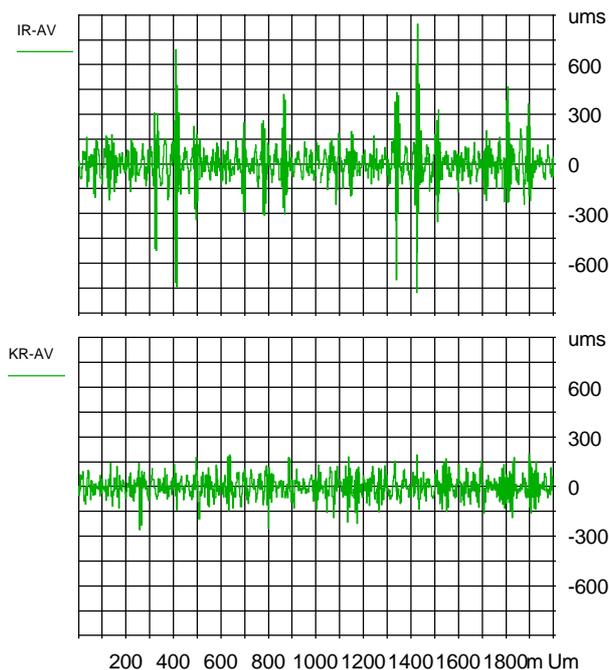


Abb. 7. Genaue Zuordnung einer Hiebmarke zum Innenring (oben, 2 Umdrehungen dargestellt). Unten ist das Signal des Kegelrollensatzes dargestellt, der keine Beschädigungen aufweist.

