

Akustische Bewertung von rotierenden Maschinen in der Produktion am Beispiel Getriebe

**Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Horst Jonuscheit,
MEDAV Digitale Signalverarbeitung GmbH, Uttenreuth**

1 Einleitung

In vielen Prüfanlagen stellt sich das Problem, wie die Prüfkriterien zur akustischen Bewertung des Prüflings erarbeitet werden könne. Stand der Technik ist, dass Schwellwerte für den GUT-Zustand definiert werden.

An dieser Stelle betrachten wir die Aufgabenstellung der Qualitätsprüfung von rotierenden Maschinen in der Serienprüfung. Ziel der Prüfung ist eine möglichst weitgehende Fehlerdiagnose im Sinne der Identifikation schadhafter Komponenten bzw. der Erkennung eines speziellen Fehlerbildes. Weder das traditionelle schwellwertentscheiderbasierte Vorgehen noch innovative Mustererkennungsverfahren wie z.B. neuronale Netze haben sich bei der Fehlerdiagnose aus unterschiedlichen Gründen durchgesetzt.

Hier wird am Beispiel der Pkw-Getriebeproduktion das Verfahren des Dualklassifizierers erläutert, das derzeit in einem Prototypsystem erprobt wird.

2 Die akustische Prüfung

Bild 1 zeigt ein Blockschaltbild für ein Messsystem, wie es für akustische Erfassungs- und Analyseaufgaben eingesetzt wird.

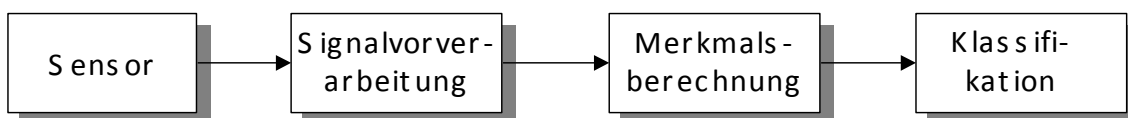


Bild 1: Blockschaltbild für ein Signalanalyseystem

Typischerweise werden als Akustiksensoren Mikrofone und Körperschallaufnehmer verwendet. Häufig ist es Untersuchungsgegenstand in Studien, das „optimale“ Sensorkonzept bezüglich Sensorauswahl, Messort und Kanalzahl zu erarbeiten.

Bei der Signalvorverarbeitung werden fundamentale Operationen am (analogen) Messsignal durchgeführt. Beispiele sind: AD-Umsetzung, Segmentierung, Fensterung, Filteroperationen.

Das Modul Merkmalsberechnung konzentriert sich auf Analyseverfahren, die die entscheidenden Informationen für die nachfolgende Klassifikation aus dem Signal extrahieren. Es kommen gegebenenfalls auch parallel unterschiedliche Analyseverfahren aus dem Zeit- und Frequenzbereich zum Einsatz. Typisch ist die Frequenzanalyse für Klangprüfaufgaben und die Ordnungsanalyse für Untersuchungen an rotierenden Maschinen.

Gerade auf letzteres Verfahren wird hier weiter eingegangen. Bei der Ordnungsanalyse werden neben dem Schwingungssignal auch die korrespondierenden Drehzahlsignale aufgezeichnet und analysiert. Konkret erfolgt eine drehzahlsynchrone Spektralanalyse, was gegenüber der herkömmlichen zeitsynchronen Analyse mit FFT den entscheidenden Vorteil beinhaltet, dass Drehzahlschwankungen nicht zu einer Verschmierung von Frequenzlinien führt. Bild 2 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Ordnungslinien und korrespondierenden mechanischen, rotierenden Erregern.

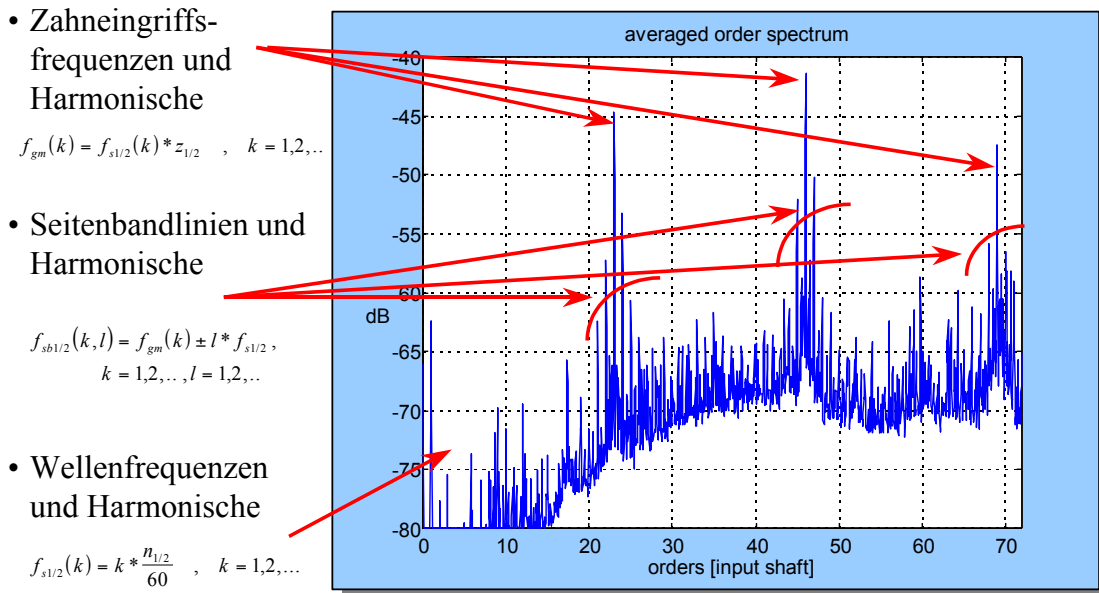


Bild 2: Ordnungsspektrum. Einzelne Spektrallinien können drehzahlunabhängig ihren mechanischen Erregern zugeordnet werden, sofern die Auflösung ausreichend hoch gewählt wird. Neben der möglichen Auslösung ist die Umsetzung des Algorithmus und (Drehzahl-) Signalqualität von entscheidender Bedeutung für den Analyseerfolg.

Die Ordnungsanalyse wird im später vorgestellten Verfahren des Dualklassifizierers eingesetzt.

Bei der Klassifikation wird der Ausgang des Moduls Merkmalsberechnung, der sogenannten Merkmalsvektor „verglichen“ gegen Referenzwerte und zudem interpretiert. Schwellwertentscheider sind traditionelle Verfahren, innovative Verfahren sind neuronale Netze, Fuzzy Logic, Case Based Reasoning etc.

3 Stand der Technik bei den Klassifikationsverfahren

Die Verwendung von Schwellwertentscheidern (Toleranzschläuchen) ist Stand der Technik bei der Getriebeprüfung in der Serienproduktion. Im Grundsatz werden auf der Basis von Referenzsignalen die Schwellwerte definiert. Die Referenzsignale werden vom Geräuschexperten auf ihren Qualitätsbezug bewertet. Durch Nutzung statistischer Kenngrößen wie Mittelwerte und Standardabweichung können Schwellwerte relativ einfach vorgegeben und mit Offsets mehr oder weniger manuell auf die Werksqualitätsnorm abgestimmt werden.

Dieses Vorgehen ist leicht verständlich und vom Grundsatz her vom Anwender akzeptiert.

Innovative Verfahren der statistischen Mustererkennung, z.B. neuronale Netze, sind in der Serienproduktion von Getrieben derzeit nicht im Einsatz gleichwohl verschiedentlich Ansätze hierzu unternommen wurden. Diese Verfahren zeigten sich aus verschiedenen Gründen als unhandlich für die praktische Verwendung bei komplexen Aggregaten.

4 Kritik am Stand der Technik

Das Ziel, eine Fehlerdiagnose bei komplexeren Maschinen wie z.B. Getrieben zu unterstützen, erfordert tiefgehende Produkt- und Prozesskenntnisse. Die Kenntnisse müssen in Algorithmen umgesetzt und diese programmiert werden. Da sich reale System in der Regel nichtlinear verhalten und sich manche Phänomene auch nicht mathematisch beschreiben lassen, führt diese Vorgehensweise zu erheblichem Aufwand. Traditionell werden bei der Getriebeprüfung Schwellwertentscheider eingesetzt.

Die heuristische Vorgehensweise, Schwellwerte aufgrund der statistischen Momentenauswertung zu beschreiben, erfordert ebenfalls hohen Aufwand zur Pflege der Schwellwerte. Gerade die Berücksichtigung von Rückläufern führt regelmäßig zu nennenswerten Aufwendungen bei der Überarbeitung der Schwellwerte.

Sind Schwellwerte definiert, so liegen diese in der Regel an Absolutwerte von Messgrößen gekoppelt. Rauschartige Signalanteile können dabei verstärkt die Messergebnisse beeinträchtigen – Schwellwertentscheider sind damit rauschempfindlich.

Es ist in der Praxis festzustellen, dass die Pflege der Toleranzbänder nennenswerte Aufwendungen verursacht. Dies gilt insbesondere dann, wenn die betriebsinterne Qualitätsnorm sehr hoch ist. Je mehr „Sonderfälle“ und sonstige „Effekte“ zu berücksichtigen sind, desto aufwendiger wird die Pflege und Anpassung an neue Sachverhalte und Forderungen.

Innovative Mustererkennungsverfahren wie z.B. neuronale Netze bieten eine Anzahl von Vor- und Nachteilen, die an dieser Stelle genannt werden sollten. Wesentliche Vorteile sind, dass auf die Entwicklung von Algorithmen und deren Programmierung verzichtet werden kann, da die Unterscheidung der verschiedenen Qualitätsstufen über Training und Test ausgewählter, bewerteter Signalproben erfolgen. Neuronale Netze können schnell entwickelt und angepasst werden.

Es zeigt sich, dass Erfahrung im Umgang mit neuronalen Netzen erforderlich ist, um eine möglichst gute Systemeinstellung und –performance zu erzielen.

Besonders wichtig für ein „gutes“ System ist, dass ein ausreichender Datenbestand für das Training zur Verfügung steht. Für jede Qualitätsstufe ist eine repräsentative Auswahl an Mustern nötig – ohne diese geht es nicht. Dies bedeutet, dass je nach Serienstreuung und Ausprägung von Unterschieden der einzelnen Klassen mehr oder weniger viele Trainings- und Testmuster verfügbar sein müssen. Es ist in der Regel nicht zumutbar, dass Serienprüfstände längere Zeit belegt und Produkte manipuliert werden, um Trainings- und Testmuster zu erhalten.

5 Dualklassifizierer zur Fehlerdiagnose

Das Verfahren des Dualklassifizierers verbindet die positiven Eigenschaften von traditionellem Schwellwertentscheider und innovativem Mustererkennungsverfahren mit dem Ziel, die Fehlerdiagnose zu unterstützen. Der Dualklassifizierer beinhaltet zwei parallel geschaltete Klassifikationszweige, die nachfolgend vorgestellt werden.

Bild 3 zeigt das Blockschaltbild des Dualklassifizierers. Der obere Zweig repräsentiert das Subsystem für die Grobdiagnose. Der Merkmalsvektor enthält mindestens ein hochaufgelöstes Ordnungsspektrum.

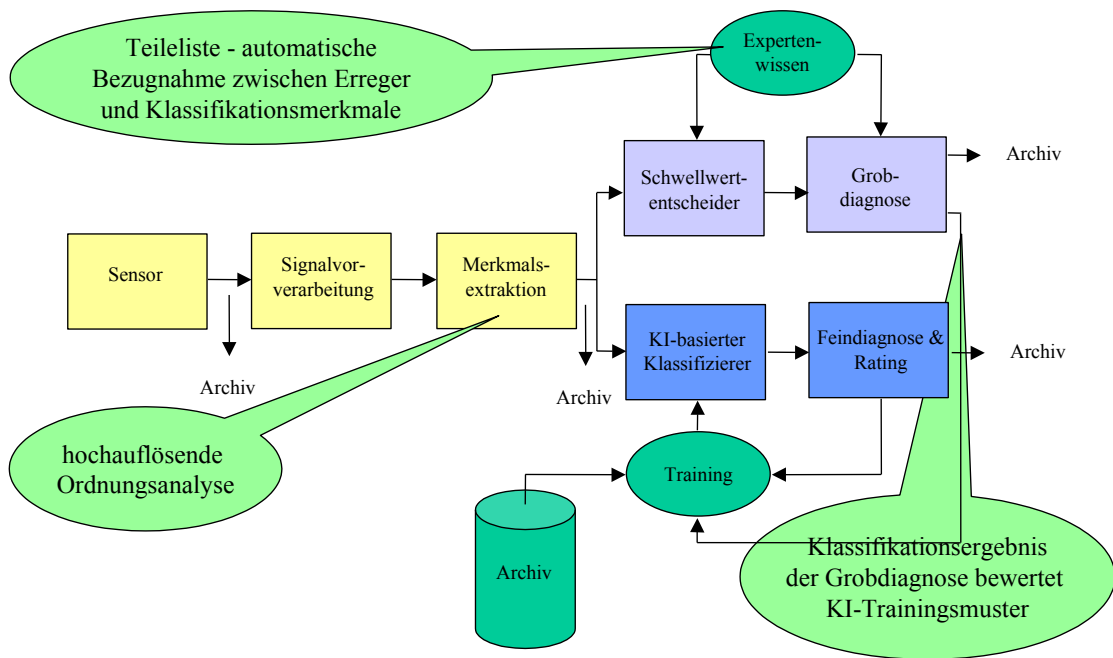


Bild 3: Dualklassifizierer mit den Subsystemen Grobdiagnose (oberer Zweig) und Feindiagnose (unterer Zweig)

Bei der Grobdiagnose werden Schwellwerte definiert wie oben unter Stand der Technik beschrieben. Diese Schwellwerte können bereits mit relativ wenigen Messungen bestimmt werden.

Zur Fehlerdiagnose wird Expertenwissen genutzt. Dieses Expertenwissen ist dadurch gekennzeichnet, dass die Stückliste des Prüflings inklusive Kinematikinformationen automatisch umgesetzt wird in eine Liste der „angeregten Ordnungen“. Aufgrund der hochauflösenden Ordnungsanalyse kann damit eine sehr zuverlässige Interpretation von Ordnungslinien im Hinblick auf ihre mechanischen Erreger erfolgen. Der Umfang dieser Stückliste sollte auf die interessierenden rotierenden Komponenten beschränkt sein, denn nur diese Information wird genutzt. Damit ergeben sich im Praxiseinsatz für Pkw-Getriebe Stücklisten mit bis zu 10 bis 20 Einträgen.

Bei der Diagnose werden damit diejenigen mechanischen Komponenten identifiziert, deren Spektrallinien ausserhalb des Toleranzschlauches liegen.

Es empfiehlt sich, ein „komplettes“ Spektrum für diese Diagnose zu nutzen. Es sind fallweise Spektrallinien auffällig, die keine angeregten Ordnungen darstellen. Diese stammen z.B. von externen An- und Abtrieben oder sind Geisterordnungen bedingt durch ungenaue oder beschädigte Bearbeitungsmaschinen.

Dieses Subsystem wurde als Grobdiagnose bezeichnet. Dieser Begriff beschreibt das Potenzial der Diagnose: Dieser Ansatz unterstützt die Fehlererkennung von defekten Komponenten, die auf angeregte Ordnungen fallen; die Zuordnung auf eine einzelne Komponente muss nicht gegeben sein.

Erweiterung gegenüber dem traditionellen Schwellwertentscheider:

- Stückliste unterstützt die Diagnose
- Stückliste ist kurz, wird einmal eingegeben und automatisch ausgewertet
- Archivieren des Merkmalvektors und des Grobdiagnose-Entscheidung

Neben der Grobdiagnose wird das Subsystem der Feindiagnose nach Bild 3 eingesetzt. Der Merkmalsvektor enthält wiederum mindestens das hochaufgelöste Ordnungsspektrum.

Bevor das Feindiagnosesystem genutzt werden kann, benötigt es eine breitere Wissensbasis im Sinne archivierter Merkmalsvektoren und zugehöriger Bewertungen. Als Bewertungen können die Ergebnisse der Grobdiagnose verwendet werden, oder gerade bei Rückläufern wichtig, umbewertete Datensätze, oder die Berücksichtigung von Zusatzinformationen für spezielle Fehlerbilder oder Ratingklassen.

Sobald ausreichend Muster für einige Qualitäts- bzw. Fehlerklassen vorhanden sind, kann das Feindiagnosesystem trainiert und validiert werden.

Über den Produktlebensdauer fallen immer mehr und mehr Daten und damit auch Wissen an. Dieses Wissen kann dazu genutzt werden, Trainingsbasis und Diagnosetiefe zu verbessern. Gleichzeitig kann der Aufwand für die Pflege der Schwellwerte nachhaltig reduziert werden. Ziel ist es, die Schwellwerte möglichst früh unverändert zu belassen und die Erfahrungen über der Zeit nur noch im Subsystem der Feindiagnose zu berücksichtigen.

Besonders wichtig ist, dass der überwiegende Anteil an der Produktion, der GUT-Anteil, (vom Grobdiagnosesystem) automatisch gelabelt zur Verfügung steht.

Erweiterung gegenüber dem Grobdiagnosesystem:

- Wissensverarbeitung durch Training anhand archivierter, bewerteter Datensätze
- Potenzial zur Einbindung von Fehlerbildern, z.B. Kopfträger
- Potenzial für Ratingschema
- Einfache Berücksichtigung von Phänomenen und Sonderfällen, z.B. viele Spektrallinien nahe am oberen Schwellwert sind unerwünscht ...

Durch die Parallelschaltung beider Diagnoseansätze werden zusätzliche Vorteile geschaffen:

- Einsatz ab dem ersten Prüfling (Grobdiagnose)
- Feindiagnose lernt vom Grobdiagnosesystem
- Nachhaltig reduzierter Aufwand für (risikobehaftete) Schwellwertpflege durch erfahrungsbedingter Verbesserung bei der Feindiagnose
- Erkennung neuer Fehler durch Grobdiagnose
- Verbesserte Diagnose durch Feindiagnose

Damit gelingt es, die Vorteile aus beiden Verfahren (Schwellwertentscheider und KI-basiertes System) zu nutzen und dabei den Aufwand an „Pflegearbeiten“ insgesamt zumindest mittelfristig zu reduzieren.

6 Anwendungen und Zusammenfassung

Der Dualklassifizierer wurde innerhalb eines EU-teilfinanzierten Projekts entwickelt. Die Erprobung erfolgt insgesamt an vier unterschiedlichen Prototypsystemen. Der erste Prototyp mit Fehlerdiagnose zur Identifikation schadhafter Komponenten und Erkennung von speziellen Fehlerbildern wurde im Mai 2000 bei ZF Getriebe GmbH in Saarbrücken in Betrieb genommen. Bild 4 zeigt die Prü fzelle für Automatikgetriebe, bei der der Luftschall ausgewertet wird. An anderer Stelle wird Körperschall ausgewertet.



Bild 4: Luftschallbasierte Geräuschprüfung mit Fehlerdiagnose an Automatikgetrieben

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Verknüpfung von traditionellem und innovativem Verfahren im Hinblick auf eine wirtschaftliche Lösung für die Fehlerdiagnose in der Serienprüfung gegenüber Einzelverfahren erhebliche Vorteile bietet. Mit Hilfe des Dualklassifizierers, der bereits in die Industrie eingeführt wird, ohne dass sich durch die Verwendung zweier parallel arbeitender Verfahren Doppelarbeit ergibt. Vielmehr wird der Anwender das jeweils günstigere Verfahren nutzen können.

Der Dualklassifizierer unterstützt die Fehlerdiagnose bei rotierenden Maschinen. Getriebe, Verbrennungsmotoren, Elektromotoren, Pumpen sind eine Anwendungsbeispiele hierfür.