

Erkennung von Beschädigungen an rotierenden Teilen

Dr. Thomas Lewien

DISCOM Industrielle Meß- und Prüftechnik GmbH, 37073 Göttingen

1 Übersicht

Der Fertigungsprozeß mechanischer Aggregate wie Zahnräder, Getriebe, Lager und Einspritzpumpen wird zunehmend durch eine akustische Endkontrolle überwacht. Gewünscht wird die Erkennung und die spezifische Zuordnung von akustisch erkannten Fehlern zu Bauteilgruppen und Prozeß-Störungen.

Dieser Aufsatz stellt Meß- und Auswerteverfahren vor, die eine Erkennung mechanischer Ursachen aus dem akustischen Signal über umdrehungssynchrone Signalanalyse ermöglichen. Primäres Ziel der Analyse ist es, mechanische Größen wie Oberflächenstruktur oder Unwuchtverhalten zu ermitteln. Aus der Oberflächenstruktur werden dann auch spektrale Klassifikationen abgeleitet. Bei mehreren Baugruppen eines Aggregats (Lager, Verzahnungen) können die Oberflächen der Baugruppen häufig getrennt werden.

Umdrehungssynchrone Meßverfahren bilden eine konstante Anzahl von Meßwerten pro Umdrehung einer Welle des Prüflings, indem sie das akustische Signal neu abtasten. Diese Meßverfahren besitzen gegenüber rein spektralen Verfahren den Vorteil der guten Erkennung von Beschädigungen mit geringer akustischer Gesamtenergie sowie die gute Zuordnung von Fehlern zu Baugruppen, da die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen getrennt vorliegen.

Die umdrehungssynchronen Meßverfahren wurden erweitert, um auch Teile mit nur bedingter Synchronität zwischen mechanischen Vorgängen und Umdrehungen behandeln zu können. Hierzu gehören unbelastet gemessene Getriebe, Pumpen sowie eine Reihe von Lagerformen.

Die Verfahren benötigen eine erhebliche Rechenleistung, die jedoch mit Multiprozessor-Systemen auf der Basis von Floating-Point-DSPs TMS 320C40 mit ca. 500 MIPS erreicht wird.

2 Umdrehungssynchrone Neuabtastung

Das Körperschallsignal des Prüflings wird je nach Anwendungsfall über Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitssensoren aufgenommen und vorverstärkt. Die in unseren Systemen verwendeten Signalprozessormodule TXBADF bestehen aus vier unabhängigen Eingangskanälen mit programmierbarer Verstärkung, differentiellem Eingang, festen Anti-Aliasing Filtern und einer programmierbaren Stromquelle zur Versorgung von ICP-Beschleunigungs-Aufnehmern. Pro Kanal wird ein Sigma-Delta-A/D-Wandler eingesetzt, der bei (festen) Abtastraten von 100 kHz, 50 kHz oder 25 kHz eine Auflösung von 16 Bit bei einem Signal-Rauschspannungsabstand von über 90 dB erreicht.

Das digitalisierte Signal wird auf einem Floating-Point Signalprozessor TMS320C40 mit 275 MIPS bei 50 MFLOPS weiterverarbeitet. Hier findet die umdrehungssynchrone Neuabtastung der Meßwerte statt.

Bei einer Eingangs-Abtastrate von 50 kHz können gleichzeitig drei Neuabtastungen vorgenommen werden. Ausgehend von dem vorhandenen Drehzahlsignal der Antriebswelle wird die Umdrehungsgeschwindigkeit innerer Wellen aus dem Übersetzungsverhältnis berechnet. Für drei Wellen beispielsweise eines Getriebes können Zeitsignale gewonnen werden, die eine feste Anzahl von Samples pro Umdrehung der Welle aufweisen. Zur Abtastraten-Reduktion wird ein digitales Prototyp-FIR-Filter je nach Drehzahl variabel abgetastet und auf das Eingangssignal angewandt. Das System kann beliebige Abtastverhältnisse im Bereich von 1:1 bis 1:200 dynamisch realisieren. Hierzu wird auf eine virtuelle Abtastrate des 100-fachen der Eingangs-Abtastrate interpoliert (5 MHz) und von dieser die Unterabtastung vorgenommen.

Eine Neuberechnung des Abtastratenverhältnisses aus der Eingangsdrehzahl wird 20 mal pro Sekunde vorgenommen, um auch dynamische Drehzahlveränderungen verfolgen zu können.

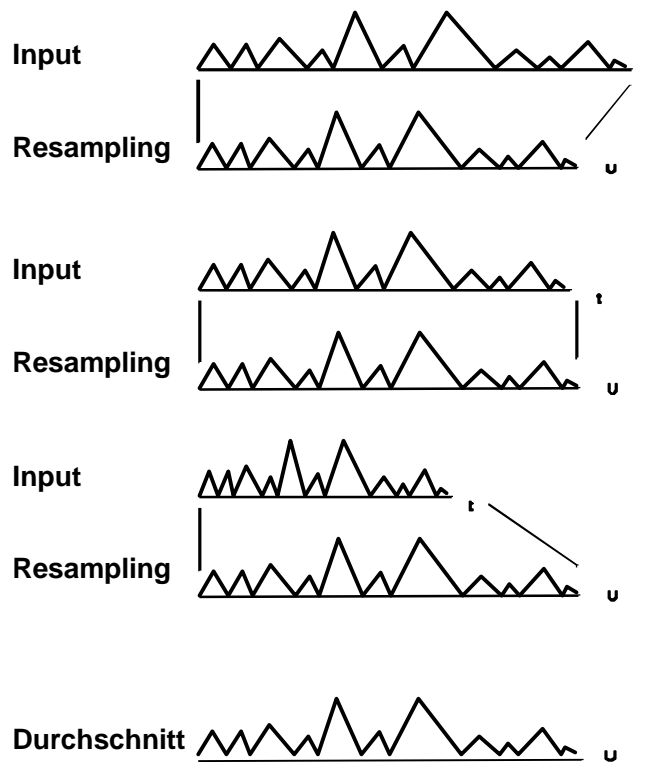


Bild 1: Umdrehungssynchrone Neuabtastung

Weiterhin einstellbar ist die Anzahl der Umdrehungen, die zu einer Oberflächenberechnung herangezogen werden. Bei vier Umdrehungen erhält man eine Ordnungsauflösung von 1/4 Ordnungen.

Die Analyselänge selbst und damit die Maximal-Ordnung ist ebenfalls in weiten Bereichen einstellbar. Bei einer FFT-Länge von 2048 Samples und einer Ordnungs-Auflösung von 1/4 Ordnung stellt das System 256 Ordnungen dar.

Durch diese umdrehungssynchrone Abtastung steht für jede Welle ein phasenstarr mit der Umdrehung gekoppeltes Signal mit einer festen Anzahl von Samples zur Verfügung. Dieses Signal wird nun über aufeinanderfolgende Umdrehungen mit einer einstellbaren Zeitkonstanten gemittelt.

Der Mittelungsvorgang unterdrückt nicht synchrone Signalanteile mit $1/\sqrt{\text{Umdrehungen}}$. Hierzu zählen die Signalanteile anderer Wellen. Eine Ordnung wird daher bei der erzeugenden Welle hervorgehoben. Es werden in der Praxis 15-20 dB Selektion erreicht. Analysen des Zeitsignals wie RMS-Werte und Crest-Faktoren profitieren ebenfalls von der phasenstarrten Mittelung, da Oberflächenbeschädigungen deutlich hervortreten.

3 Abweichungen von der Synchronität

Die umdrehungssynchrone Analyse verwendet eine Drehzahlinformation um die Bewegungsabläufe innerer Baugruppen eines Aggregats zu verfolgen. Eine phasenstarre Kopplung ist jedoch nur etwa bei verzahnten Getrieben unter Last gegeben. Bereits bei lastlosen Getrieben, bei Übertragungen mit Schlupf oder bei mechanisch weniger eng gekoppelten System variiert die Phasenlage von äußerer (beobachtbarer) Welle und innerer Bewegungsform oder läuft bei Schlupf sogar davon.

Wird über auf diese Weise von einer Umdrehung zur nächsten voneinander abweichenden Signale gemittelt, so fehlen im Ergebnis die hochfrequenten Anteile. Die drehwinkel-bezogene Auflösung des Verfahrens hat sich deutlich verschlechtert.

Hier hilft das Verfahren des Dynamic Time Warping, das eine Verzerrung der Zeitachse zwischen mehreren Datensätzen ausgleicht (Abbildung 2). Das Dynamic Time Warping wird z.B. in der Spracherkennung benutzt, um unterschiedliche Sprechgeschwindigkeiten auszugleichen.

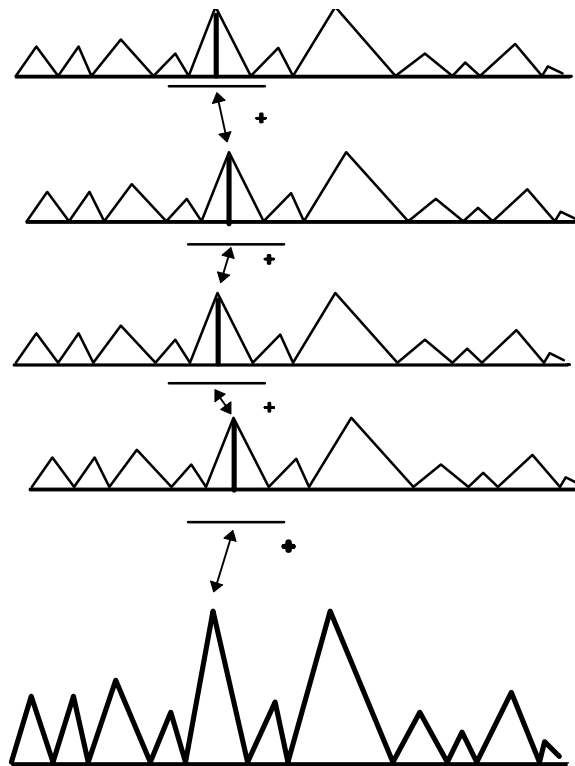


Bild 2: Phasenkorrektur durch Dynamic Time Warping

Das Verfahren wird hier angewandt, um eine neu aufgenommene Umdrehung an den bereits gewonnenen Mittelwert der letzten Umdrehungen anzupassen. Abschnitte des neu aufgenommenen Signals werden versuchsweise im Drehwinkel verschoben. Der Abschnitt wird in der Lage zum Mittelwert hinzugeschlagen, in der er die beste Übereinstimmung zeigt. Die Stabilität des Verfahrens wird dadurch sichergestellt, daß nur eine bestimmte Maximalverschiebung erlaubt ist und daß nicht nur der Abschnitt selbst, sondern auch seine Umgebung zum Mittelwert passen müssen. Niedrige Verschiebungen werden zusätzlich durch geeignete Wichtungen bevorzugt. Das Dynamic Time Warping kann ferner zum Ausgleich von Schlupf in einer Übersetzung verwendet werden.

4 Erkennung von Beschädigungen

Die umdrehungssynchronen Verfahren werden unter anderem eingesetzt, um lokale Oberflächenfehler an Drehteilen zu erkennen, die spektral oder über Einhüllenden-Verfahren nur unzureichend gefunden werden können.

Die Pulsenergie von Beschädigungs-Zeitsignalen wird im Spektrum auf eine Reihe von äquidistanten Spektrallinien verteilt. Spektrale Grenzwerte, die z.B. für Geometriefehler von

Verzahnungen mit damit zusammenhängenden Heulgeräuschen ausgelegt sind, werden selten überschritten. Ein übliches Verfahren bei spektralen Untersuchungen besteht in der Anwendung von Cepstralanalysen, die die Energie der äquidistanten Spektrallinien durch erneute Anwendung einer Fouriertransformation wieder auf einen Meßwert konzentrieren. Cepstrale Verfahren leiden jedoch an einer geringen Maßstabstreue: Die Größe einer Oberflächenbeschädigung ist durch die logarithmische Behandlung der Spektren kaum abzulesen.

Etwas erfolgversprechender sind Autokorrelationsverfahren, die mit den Cepstral-Analysen über die schnelle Faltung (Wiener-Chinchin Theorem) eng verwandt sind. Betrachtet wird die Autokorrelationsfunktion des Zeitsignals. Periodische Anteile werden zumindest maßstabsgetreu ermittelt als Maxima der Autokorrelationsfunktion ermittelt. Problematisch ist die Empfindlichkeit des Verfahrens gegenüber Störgeräuschen von anderen mechanischen Baugruppen. Die Beschädigungen müssen sich stark vom Restgeräusch abheben, um gefunden zu werden.

Dasselbe trifft für Einhüllenden-Verfahren zu. Auch sie erkennen die Pulse von Beschädigungssignalen nur bei geringen Nebengeräuschen und bei einfachen mechanischen Systemen. Zur Verbesserung werden Einhüllenden-Verfahren oft mit Filterbänken kombiniert, die Nebengeräusche in Kanäle auftrennen. Dabei wird jedoch auch das gesuchte Beschädigungssignal aufgetrennt und ist nur bei entsprechend stärkerer Energie erkennbar.

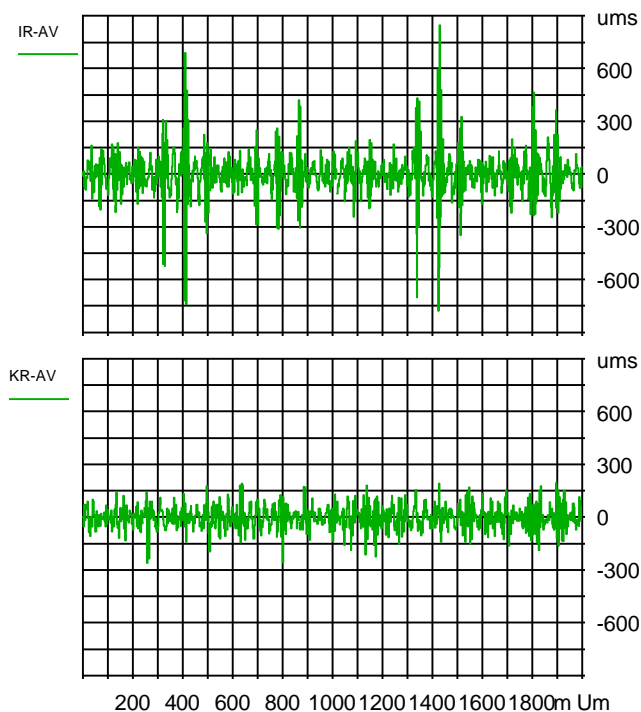


Bild 3: Genaue Zuordnung einer Beschädigung zu den einzelnen Teilen eines Lagers. Oben: Innenring, unten: Kegelrollen.

Im Gegensatz hierzu sollen zwei Beispiele die Leistungsfähigkeit umdrehungssynchroner Verfahren zeigen: Die Abbildung 3 zeigt die Analyse eines Rollen-Lagers, bei dem gleichzeitig die Oberflächen des Innenrings und der Kegelrollen aus dem akustischen Signal errechnet wurde.

Bemerkenswert ist die genaue Zuordnung der Beschädigung zum verursachenden Innenring. Im Diagramm sind zwei Umdrehungen dargestellt. Deutlich ist das zweimalige Überrollen der Beschädigungsstelle durch den Kegelrollensatz zu erkennen.

Bild 4 zeigt das Körperschall-Signal einer Einspritzpumpe, bei der neben drei Pumpvorgängen (die drei großen Pulssignale) das fehlerhafte Auftreten mechanischer Zusatzgeräusche (die drei kleinen Pulssignale) erkannt werden sollen. Die Zusatzgeräusche sind mit einer zufälligen Phasenabweichung gegenüber der Pumpenumdrehung behaftet, die jedoch durch Dynamic Time Warping ausgeglichen werden kann

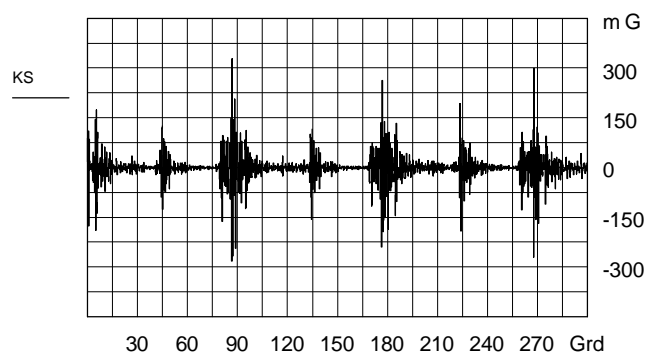


Bild 4: Stabile Erfassung vor nur bedingt phasenstarrten Pumpvorgängen durch Dynamic Time Warping

Vergleicht man spektrale und umdrehungssynchrone Verfahren, so sind spektrale Verfahren gut geeignet, um Grenzwerte für akustische Emissionen von Baugruppen in Abhängigkeit vom Einsatzort zu finden. Dies gilt um so mehr, wenn psychoakustische Parameter wie spezifische Lautheiten, Modulationen und Verdeckung durch andere Betriebsgeräusche berücksichtigt werden.

Demgegenüber besitzen umdrehungssynchrone Verfahren in der Serienendkontrolle den Vorteil, daß sie von akustische Signalen in prozeßnahe Größen umrechnen. Ermittelt werden Oberflächenstruktur, Unrundheit oder Unwucht. Dies sind Eigenschaften, die eine einfache Interpretation zulassen, da sie ein akustische relevantes Abbild des Objekts zeigen.