

# Ein neues Verfahren zur Zustandsdiagnose an rotierenden Maschinen bei veränderlichen Drehzahlen

J. Iwanow, G. Meltzer

*Es ist ein neues Verfahren der Verarbeitung von Schwingensignalen an rotierenden Maschinen zu ihrer Zustandsdiagnose entwickelt. Es besteht in der Gewinnung des Ordnungsspektrums einer Maschinenschwingung, wobei die Messung des Drehwinkels einer Maschinenwelle auch bei veränderlichen Drehzahlen dafür nicht notwendig ist. Das Verfahren nutzt die Zeit-Frequenz-Verteilung des (evtl. instationären) Maschinenschwingsignals zur Ermittlung darin enthaltener drehzahlabhängiger Schwingkomponenten und zur Bestimmung der fehlenden Funktion der Drehzahländerung. Für ein Zahnradgetriebe eines Ofenantriebs wurde das Verfahren praktisch realisiert und erprobt.*

## 1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit der Diagnose von rotierenden Maschinen bei veränderlichen Drehzahlen. Traditionell wird der Maschinenzustand bei einer konstant bleibenden Drehzahl ausgewertet. Dafür sind verschiedene bewährte Verfahren entwickelt (Kolerus, 1995; Braun, 1986). Im wesentlichen nutzen sie die Fourier-Analyse, um die Amplitudenänderung an harmonischen Frequenzkomponenten der Maschinenschwingung zu verfolgen. Bei Zahnradgetrieben sind das beispielsweise die Analyse der Harmonischen der Zahneingriffsschwingung durch das Spektrum, die Seitenbandanalyse durch das Kepstrum oder die Hüllkurvenanalyse.

Bei einer Drehzahländerung erzeugen rotierende Maschinen instationäre Schwingensignale, weil schwingungserzeugende Phänomene darin meist drehzahlabhängig sind. Die konventionelle Diagnose erfährt Schwierigkeiten beim Extrahieren von zustandsabhängigen Informationen aus solchen Meßsignalen, weil die Frequenzanalyse darauf nur beschränkt anwendbar ist.

Um die Diagnose bei veränderlichen Drehzahlen zu erlauben, wird eine spezielle drehzahlabhängige Abtastung der Schwingensignale (instrumentell oder programmtechnisch) durchgeführt. Bei den beiden Methoden werden sog. winkeläquidistant abgetastete Schwingensignale gewonnen. Darin ist die Drehzahländerung durch die Anpassung der Abtastrate eliminiert. Alle drehzahlabhängigen Komponenten sind darin stationär. Folglich sind sie wieder mit Hilfe von üblichen Verfahren (z.B. Fourier-Analyse) auswertbar. Die Fourier-Transformation (FT) des winkeläquidistant abgetasteten Signals liefert das Ordnungsspektrum, das auch bei veränderlichen Drehzahlen verschmierungsfrei ist (Kolerus, 1995).

Dieser Ansatz erfordert aber eine zusätzliche und oft kostenaufwendige Meßausrüstung, um das Schwingensignal winkeläquidistant zu digitalisieren. In Zahnradgetrieben wird dafür beispielweise eine präzise inkrementale Geberscheibe genutzt (Lieske, 1996). Deren Impulse steuern den AD-Wandler.

In der Maschinendiagnostik sind deshalb solche neuen Verfahren erwünscht, die den Maschinenzustand aufgrund von ursprünglich gemessenen instationären Signalen mit konstanter Abtastrate auswerten lassen. Im vorliegenden Beitrag wird ein solches Verfahren entwickelt. Damit kann das Ordnungsspektrum unmittelbar aus gemessenem Maschinenschwingsignal gewonnen werden, so daß die winkeläquidistante Signalabtastung und die dafür nötige zusätzliche Erfassung der Maschinendrehfrequenz wegfällt. Das Verfahren beruht auf der Zeit-Frequenz-Analyse (ZFA) der instationären Maschinenschwingungen.

## 2 Zeit-Frequenz-Analyse

### 2.1 Methode

Bekanntlich ist die klassische Spektralanalyse, die auf der FT beruht, für die Auswertung von instationären Vorgängen wenig geeignet. Die Frequenzänderung von Harmonischen im analysierten Signal kann mit der FT nicht verfolgt werden und geht daher verloren.

Die ZFA stellt eine andere Transformationstechnik dar. Sie liefert die Verteilung der Energie im Signal gemeinsam über Zeit und Frequenz und eignet sich dadurch für die Wiedergabe der Änderungen des Signalspektrums in der Zeit (Cohen, 1989; Mertins, 1996). Daher lassen sich instationäre Phänomene mit Hilfe der ZFA genauer auswerten.

Die ZFA besteht in der Praxis in der Berechnung einer Zeit-Frequenz-Verteilung  $TFD_x(t;f)$  des zu analysierenden Zeitsignals  $x(t)$ . Im Bild 1 (in der Mitte) ist als Beispiel die ZFV einer harmonischen Einkomponentenschwingung dargestellt. Für die Meßzeit 0,255s änderte sich deren Frequenz linear von 0 auf 300Hz. Diese Änderung ist in der ZFV deutlich zu erkennen. Im Frequenzspektrum des Signals im Bild 1 (unten) zeigte sich dieses instationäre Phänomen dagegen im Verschmieren der Signalenergie über das ganze Frequenzband von 0 bis 300Hz. Die Natur des Signals ist mit Hilfe der ZFV klar zu verstehen, während sie mit Hilfe des Fourier-Spektrums schwierig ist.

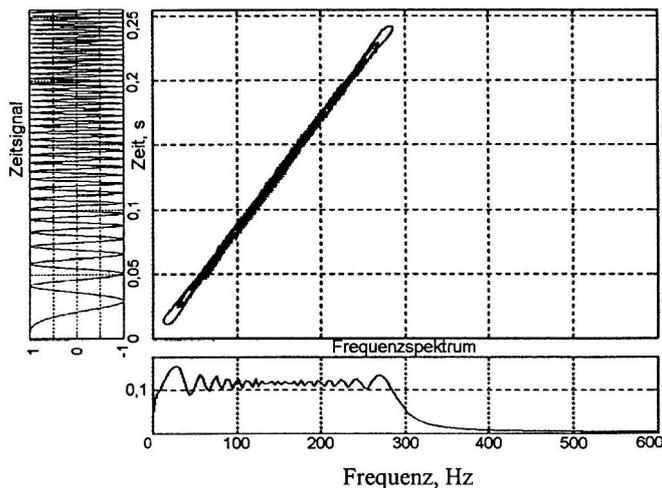


Bild 1. Wigner-Ville-Verteilung des Chirp-Signals bei der Frequenzänderung von 0 auf 300 Hz

Die ZFA ermöglicht also die präzisere Auswertung von instationären Maschinenschwingungen und das Extrahieren von Zustandsmerkmalen zur Diagnose. Diesem Thema sind Aufsätze von Forrester (1992), Choy u.a. (1997), Dalpiaz und Rivola (1995), Ivanov und Meltzer (1998) gewidmet.

Im folgenden werden 3 Vertreter der Cohen-Klasse verschiebungsinvarianter ZFV kurz dargestellt, die im entwickelten Verfahren genutzt werden. Sie sind das Spektrogramm, die Wigner-Ville-Verteilung (WVV) und die Choi-Williams-Verteilung (CWV).

### 2.2 Spektrogramm

Es besteht in der Berechnung der FT von aufeinanderfolgenden Abschnitten des Signals  $x(t)$ . Diese werden so kurz ausgewählt, daß Frequenzänderungen darin noch gering sind. Die Abschnitte werden mit Hilfe des gleitenden Zeitfensters  $w(t)$  gebildet (Cohen, 1989; Mertins, 1996):

$$SP_x(t;f) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot w(t-\tau) \cdot \exp(-2\pi jf\tau) \cdot d\tau \right|^2 \quad j^2 = -1 \quad (1)$$

Die Eigenschaften des Spektrogramms werden durch das Zeitfensters  $w(t)$  bedingt. Da dessen Breite  $T_w$  viel kürzer als die Dauer  $T$  des Meßintervalls am Signals  $x(t)$  ( $T_w \ll T$ ) gewählt werden muß, wird das Spektrogramm durch ein niedrigeres Auflösungsvermögen gekennzeichnet. Deshalb beschränkt sich seine Anwendung vorwiegend auf die Signale mit sich langsam ändernden Frequenzen. Die Vorteile des Spektrogramms gegenüber den anderen Vertretern der Cohen-Klasse sind das Nichtentstehen von Interferenztermen sowie ein mäßiger Rechenaufwand (Cohen, 1989; Mertins, 1996).

### 2.3 Wigner-Ville-Verteilung

Sie stellt eine der speziell zur Analyse zeitlich instationärer Vorgänge entwickelten ZFV dar und wird folgendermaßen definiert (Cohen, 1989; Mertins, 1996):

$$\text{WVD}_x(t; f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(t - \tau/2) \cdot x(t + \tau/2) \cdot \exp(-2\pi j f \tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

(das hochgestellte Sternchen kennzeichnet den komplex-konjugierten Funktionswert).

Da die Aufteilung des Signals  $x(t)$  in kürzere Abschnitte in (2) nicht mehr notwendig ist, ist in der WVV gegenüber dem Spektrogramm ein wesentlich höherer Auflösungsgrad erreichbar. Die WVV kann deshalb zur Analyse von Vorgängen mit stark instationären Anteilen genutzt werden.

Der Nachteil der WVV ist es allerdings, daß bei mehrkomponentiellen Signalen darin durch Interferenzen Artefakte bzw. Kreuzterme auftreten. Diese sind auf die nichtlineare Transformation der Art  $x^*(t-\tau/2) \cdot x(t+\tau/2)$  in (2) zurückzuführen (Cohen, 1989; Mertins, 1996). Die Interferenzen erschweren die Interpretierbarkeit der WVV und benötigen Mittel zu ihrer Unterdrückung. Deshalb wurden andere ZFV der Cohen-Klasse dazu entwickelt, Interferenzen zu minimieren. In den meisten Fällen wird das durch eine Wichtung  $x^*(t-\tau/2) \cdot x(t+\tau/2)$  erreicht. Eine solche ZFV ist die CWV.

### 2.4 Choi-Williams-Verteilung

Mathematisch ist sie folgendermaßen definiert (Cohen, 1989; Mertins, 1996)

$$\text{CWD}_x(t; f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{\pi\sigma/\tau^2} \cdot \exp[-\pi^2\sigma(u-t)^2/\tau^2] \cdot x^*(u-\tau/2) \cdot x(u+\tau/2) \cdot \exp(-2\pi j f \tau) \cdot du \cdot d\tau \quad (3)$$

Zur Unterdrückung der Interferenzen wird in der CWV die Wichtung des Produktes  $x^*(t-\tau/2) \cdot x(t+\tau/2)$  mit der Exponentialfunktion durchgeführt. Der Parameter  $\sigma$  steuert darin die Wichtungsintensität. Die Interferenzen können in der CWV durch die Auswahl  $\sigma$  fast völlig geglättet werden. Die Auflösung der CWV bleibt danach immer noch viel höher als die im Spektrogramm. Deshalb wird die CWV bei der ZFA von mehrkomponentiellen Signalen in Maschinen bevorzugt.

Der Nachteil der CWV ist ein weiterer Anstieg des rechentechnischen Aufwands, was allein dem Vergleich der Formeln (2) und (3) zu entnehmen ist. Außerdem ist die CWV für die Analyse nicht aller instationären Signaltypen effektiv (Cohen, 1989; Mertins, 1996).

## 3 Beschreibung des Verfahrens

Bei der Maschinendiagnose werden die winkelläquidistant abgetasteten Schwingensignale dazu genutzt, das Ordnungsspektrum oder -kepektrum der Maschinenschwingung zu gewinnen. Das Ordnungsspektrum zeigt die Verteilung der harmonischen Komponenten im Signal nicht über die Frequenzen, wie es bei einem Frequenzspektrum der Fall ist, sondern über die Ordnungen der Drehfrequenz einer Maschinenwelle. Alle drehzahlabhängigen harmonischen Komponenten besitzen darin eine bestimmte und konstante Ordnung, auch wenn sich die Drehzahl ändert. Deshalb erlaubt das Ordnungsspektrum im Gegensatz zum Frequenzspektrum die diagnostische Beurteilung des Maschinenzustands auch bei veränderlichen Drehzahlen.

Im Bild 2a ist das konventionelle Verfahren zur Bildung des Ordnungsspektrums eines Maschinenschwingensignals  $x(t)$  dargestellt. Außer dem Schwingensignal selbst soll bei diesem Verfahren zusätzlich der Drehwinkel einer Maschinenwelle oder zumindest die Maschinendrehzahl gemessen werden.

Eine neue Aufgabe besteht folglich in der Gewinnung des Ordnungsspektrums der Maschinenschwingung aufgrund nur eines einzigen vorhandenen Schwingensignals. Die Drehzahl an der Maschine kann sich dabei ändern und wird nicht direkt erfaßt.

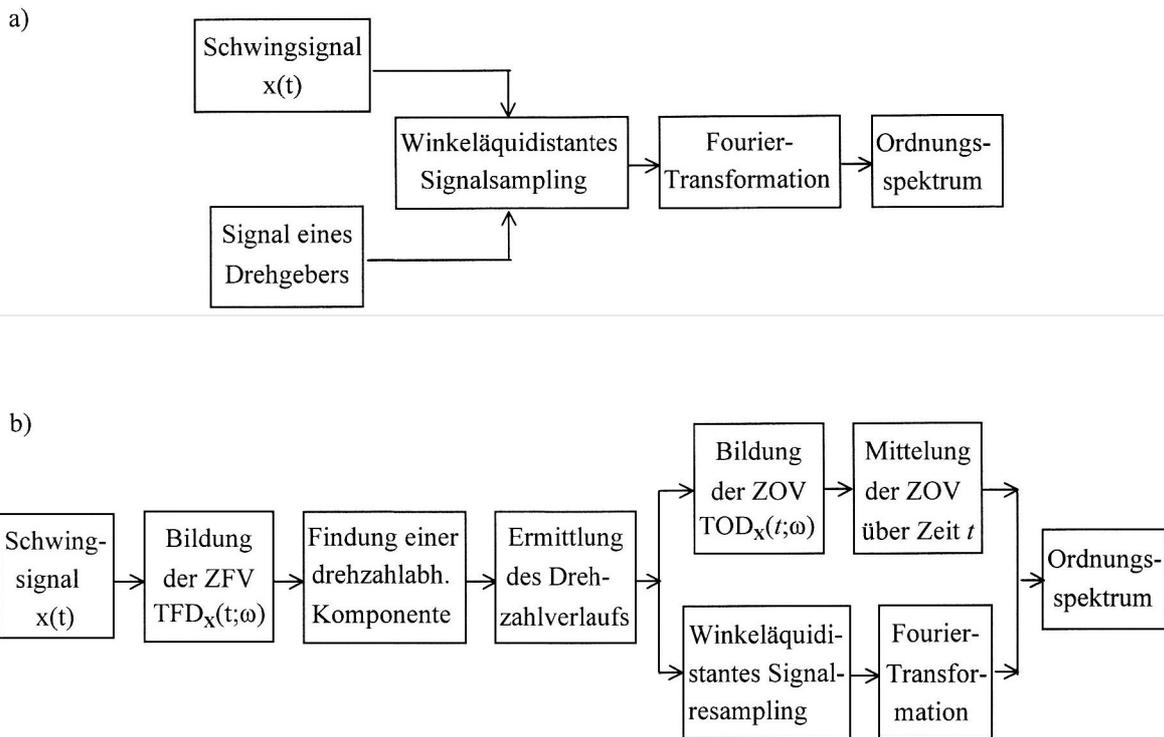


Bild 2. Algorithmen der Gewinnung des Ordnungsspektrums einer Getriebebeschwingung  $x(t)$ :  
 (a) konventionell; (b) mit Hilfe der ZFA ohne Nutzung eines inkrementalen Drehgebers

In diesem Fall erweist sich die ZFA als geeignetes Werkzeug zur Signalbearbeitung und zur Gewinnung des Ordnungsspektrums. Mit deren Hilfe kann die Funktion der Änderung des Drehwinkels an der Maschine im jeweiligen Meßintervall identifiziert, das vorhandene Schwingensignal neu winkeläquidistant digitalisiert und das Ordnungsspektrum der Maschinenschwingung berechnet werden.

Zur Erklärung der Möglichkeit der Bestimmung des fehlenden Drehwinkels an einer Maschinenwelle mit Hilfe der ZFV soll zunächst folgendes bemerkt werden. Schwingensignale an rotierenden Maschinen enthalten in der Regel eine Reihe von drehzahlabhängigen harmonischen Komponenten. Diese bilden die Vielfachen zur Drehfrequenz jeder Welle, welche in diesem Fall die Grundfrequenz ist (Kolerus, 1995). Bei Zahnradgetrieben sind diese harmonischen Komponenten beispielweise die Zahneingriffsfrequenz jeder Zahnpaarung oder die Seitenbandfrequenzen, wobei sie immer (gemäß der Getriebekinetik) in einem Vielfachen zur Drehfrequenz der jeweiligen Getriebewelle stehen. Die momentane Frequenz einer solchen drehzahlabhängigen Schwingkomponente im Signal weist daher auf die aktuelle Drehfrequenz der Welle hin. Wird die Frequenzänderung bei einer beliebigen Komponente im Schwingensignal ermittelt, deren Beziehung zur Drehfrequenz einer Welle bekannt ist, dann kann die Frequenz dieser Komponente in jedem Zeitpunkt in die Drehfrequenz der Welle umgerechnet werden. Das Integrieren der so gebildeten Funktion über die Zeit ergibt die gewünschte Veränderung des Drehwinkels an dieser Welle. Sie liefert somit eine gleiche Information, als ob sie mit Hilfe eines auf diese Welle aufgesetzten Inkrementalgebers gewonnen würde.

Der Zeitverlauf einer drehzahlabhängigen harmonischen Komponente im Schwingensignal kann in der ZFV dieses Signals ermittelt werden, weil die ZFV die Abhängigkeit der momentanen Frequenz jeder Schwingkomponente des Signals in der Zeit darstellt. So ist der Zeitverlauf der linearen Frequenzänderung bei der einzigen harmonischen Komponente im Contour-Plot der WVV im Bild 1 deutlich erkennbar. Die ZFV tritt hier folglich als Werkzeug zum Extrahieren der Informationen über die Drehzahländerung auf, die das Maschinenschwingensignal selbst enthält.

## 4 Realisieren des Verfahrens

In diesem Kapitel wird das vorgeschlagene Verfahren am Beispiel der Meßdaten eines Zahnradgetriebes für Ofenantrieb erprobt.

### 4.1 Zahnradgetriebe eines Ofenantriebs

In einem Zementwerk sollte ein automatisches System zur Zustandsüberwachung eines Doppelritzelantriebs für den Drehrohrofen eingesetzt werden. Als Meßsignale sollten Gehäuseschwingungen an einer langsamlaufenden Getriebestufe dieses Antriebs erfaßt werden. Die Auswertung des Zustandes des Zahnradgetriebes sollte danach durch die Seitenbandanalyse im Frequenzspektrum dieser Schwingungen erfolgen.

Die ersten Messungen zeigten Drehzahlschwankungen des Antriebs. Vermutlich sind sie durch betriebsbedingte Lastschwankungen am Drehrohrofen aufgetreten. Die Drehzahlschwankungen führten zu einem Verschmieren der Schwingungsspektren und erlaubten dadurch nur bedingt automatische Seitenbandanalyse.

Im Bild 3 ist das Frequenzspektrum eines am Zahnradgetriebe gemessenen Körperschallsignals dargestellt. Das Signal selbst ist im Bild 4 links (vertikal) dargestellt. Die Meßzeit betrug ca. 21 s. Im Spektrum im Bild 3 stellt das stärkste Maximum bei ca. 376 Hz die Zahneingriffsschwingung einer Getriebestufe dar. Daneben sind Maxima auch anderer Schwingkomponenten zu erkennen.

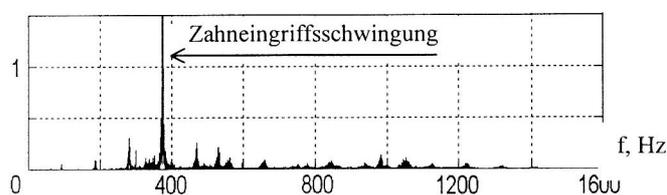


Bild 3. Frequenzspektrum des Körperschallsignals am Zahnradgetriebe eines Ofenantriebs

Im Spektrum im Bild 3 ist vor allem auffallend, daß alle Spektralpeaks ziemlich breit sind. Das war auf Drehzahlschwankungen des Zahnradgetriebes zurückzuführen. Das Frequenzspektrum war dadurch verschmiert und erschwerte die Zustandsdiagnose. Das Phänomen der Drehzahlschwankungen sollte daher genauer untersucht und ein Mittel zur Reduzierung des Spektrumverschmierens aufgrund vorhandener instationärer Meßdaten gefunden werden.

### 4.2 Signalanalyse mit Spektrogramm

Da die Schwankung der Getriebedrehzahl nicht stark war (sie betrug ca. 3%), erwies sich das Spektrogramm als geeignetes Werkzeug für die Signalanalyse.

Nach der Formel (1) wurde das Spektrogramm des Schwingensignals am Zahnradgetriebe berechnet. Im Bild 4 (in der Mitte) ist das Contour-Plot dieses Spektrogramms dargestellt. Dabei wurde das rechteckige Zeitfenster  $w(t)$  der Breite  $T_w=0,1645$  s genutzt. Der Wert  $T_w$  wurde so ausgewählt, um ein optimales Verhältnis zwischen Zeit- und Frequenzauflösung im Spektrogramm zu erreichen. Im Bild 4 sind auch das transformierte Zeitsignal (links vertikal) und dessen Frequenzspektrum (unten) zu sehen. Dieses wurde durch die Mittelung des Spektrogramms  $SP_x(t;f)$  über die Zeit  $t$  erhalten.

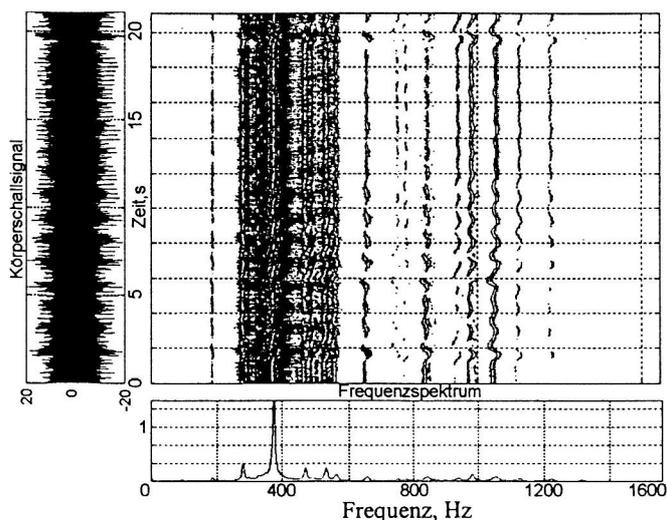


Bild 4. Spektrogramm des Körperschallsignals am Zahnradgetriebe eines Ofenantriebs (in der Mitte) und das durch ihre Zeitmittelung berechnete Frequenzspektrum (unten)

Die Komponenten der Getriebebeschwingung, die im Spektrum als Maxima auftraten, zeigen sich im Contour-Plot des Spektrogramms im Bild 4 als Reihe von vertikalen Strukturen. Sie sind über die ganze Meßzeit  $T=21$ s vorhanden. Die momentane Frequenz jeder Komponente weist jedoch eine irreguläre Schwankung um den jeweiligen Mittelwert auf. Das erklärte die Ursache für das Verschmieren der Maxima der Schwingkomponenten im Frequenzspektrum (s. Bild 4 unten). Dieses Spektrum liefert die Frequenzverteilung der Energie im Signal für das ganze Meßintervall von 21s. Innerhalb dieses Intervalls erfuhren die drehzahlabhängigen Komponenten der Getriebebeschwingung eine vielfache Frequenzänderung.

Im Spektrogramm im Bild 4 ist auch zu bemerken, daß die Frequenzschwankung bei höheren Frequenzkomponenten stärker ist. Daher sind sie im Spektrum (s. Bild 3) stärker verschmiert. Außerdem erfolgt die Frequenzschwankung bei allen Signalkomponenten synchron. Das läßt eine gemeinsame Ursache vermuten, die mit einer großen Wahrscheinlichkeit eine Schwankung der Getriebedrehzahl war.

### 4.3 Gewinnung des Ordnungsspektrums

Im Spektrogramm im Bild 4 ist die Frequenzänderung bei mehreren Schwingkomponenten gut zu erkennen. Nach der Auswahl einer Komponente kann die ZFV für jeden Zeitpunkt so normiert werden, daß sich die Ordnung dieser Komponenten darin immer auf Eins bezieht. Dadurch werden die Frequenzen in der ZFV durch die Ordnungen der ausgewählten Komponente ersetzt. Die neugebildete Funktion ist daher als Zeit-Ordnung-Verteilung (ZOV) zu bezeichnen.

Das Spektrogramm im Bild 4 wurde auf die Komponente der Zahneingriffsschwingung bei ca. 376 Hz normiert, weil sie die stärkste und daher am einfachsten erkennbar war. Das Algorithmus zu ihrer Erkennung bestand darin, daß in der Funktion  $SP_x(t^*;f)$  in jedem Zeitpunkt  $t=t^*$  ein Maximum bei ca. 376 Hz bestimmt wurde. Dessen Frequenzwert  $f_z$  wurde immer als erste Ordnung betrachtet. Die Komponenten der Getriebebeschwingung bei anderen Frequenzen  $f$  bildeten dann die Vielfachen davon als  $f/f_z$ .

Im Bild 5 (in der Mitte) ist das Contour-Plot der so gebildeten ZOV  $SP_x(t;f/f_z)$  dargestellt. Die horizontale Achse stellt darin die Ordnungen  $f/f_z$  der Zahneingriffsfrequenz dar. Ähnlich der ZFV im Bild 4 ist in der ZOV im Bild 5 eine Reihe von vertikalen Linien zu sehen. Diese stellen wieder die gleichen Komponenten der Getriebebeschwingung dar. Im Gegensatz zur ZFV (s. Bild 4) besitzen sie aber in der ZOV (s. Bild 5) konstante Ordnungen. Der Effekt der Schwankung der Getriebedrehzahl tritt somit in der ZOV (fast) nicht in Erscheinung. Eine unveränderliche Lage der erwähnten Schwingkomponenten auf der Ordnungssachse weist darauf hin, daß sie drehzahlabhängig waren.

Im Bild 5 links (vertikal) ist dasselbe Signal des Zahnradgetriebes im Meßintervall  $0 \leq t \leq T$ ,  $T=21$  s dargestellt. In diesem Intervall wurde die Mittelung der ZOV  $SP_x(t;f/f_z)$  über die Zeit  $t$  vorgenommen. Da die ZOV  $SP_x(t^*;f/f_z)$  in jedem Zeitpunkt  $t=t^*$  ein momentanes Ordnungsspektrum der Getriebebeschwingung ist, ist das Resultat der Zeitmittelung der ZOV als Ordnungsspektrum  $S_x(f/f_z)$  für das Analyseintervall  $0 \leq t \leq T$  zu bezeichnen. Im Bild 5 ist es unten dargestellt. Darin nimmt die stärkste Komponente der Zahneingriffsschwingung bei 376 Hz die Ordnung Eins ein. Dieser und andere Peaks sind im Ordnungsspektrum schmäler als die im Frequenzspektrum. Besonders ist dieser Unterschied für die Komponenten bei höheren Frequenzen bzw. Ordnungen sichtbar, welche die stärksten Schwankungen aufwiesen und deshalb im Frequenzspektrum stärker verschmiert waren. Nach dem Eliminieren des Einflusses der Frequenzschwankung ist die verbleibende Breite der Maxima im Ordnungsspektrum hauptsächlich auf seine begrenzte Auflösung sowie auf Rechenfehler der zusätzlichen digitalen Signalverarbeitung zur Bildung von  $S_x(f/f_z)$  zurückzuführen. Da das Ordnungsspektrum schmalere Spektrallinien besitzt, läßt es den Zustand von Zahnrädern genauer auswerten.

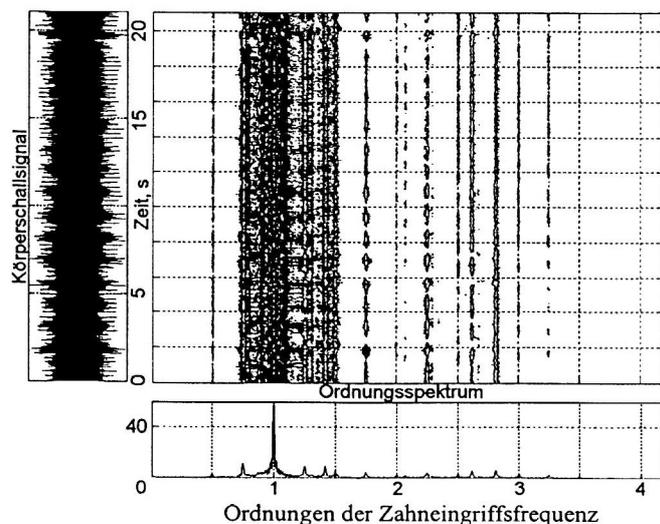


Bild 5. Die vom Spektrogramm im Bild 4 gebildete Zeit-Ordnung-Verteilung (in der Mitte) und das durch ihre Zeitmittelung berechnete Ordnungsspektrum

#### 4.4 Nutzung anderer ZFV

Die reduzierte Auflösung des Spektrogramms führt zu einer reduzierten Auflösung auch im dadurch gebildeten Ordnungsspektrum. Im vorigen Beispiel betrug die Auflösung des Ordnungsspektrums den Wert  $(f_z \cdot T_w)^{-1} = 0,016$  Ordnungen, obwohl sie bei den vorhandenen Meßdaten der Dauer von  $T = 21$  s den Wert  $(f_z \cdot T)^{-1} = 0,00013$  Ordnungen erreichen kann. Es wird erwartet, daß solche Auflösungsschärfe im Ordnungsspektrum durch die Nutzung anderer ZFV, z.B. der WVV oder der CWV erreichbar ist, da sie im Unterschied vom Spektrogramm bei ihrer Bildung keine Fensterung mit  $w(t)$  benötigen.

Bei anderen Typen der ZFV der Cohen-Klasse müssen jedoch weitere Schwierigkeiten in Kauf genommen werden:

- Auftreten von Interferenzen in den ZFV (s. Abschnitt 2.3);
- Steigerung des Rechenaufwandes, da Algorithmen anderer ZFV rechenintensiver sind.

Im Bild 6 (in der Mitte) ist das Contour-Plot der WVV eines Abschnitts des vorigen Getriebeschwingsignals dargestellt. Die WVV wurde nach der Formel (2) berechnet, wobei das Signal  $x(t)$  zunächst mit Hilfe der Hilbert-Transformationen in seine analytische Form (Mertins, 1996) umgewandelt wurde. Die vertikalen Linien stellen in der WVV im Bild 6 wieder die Komponenten der Getriebeschwingung dar. Ihre Terme sehen aber in der WVV im Unterschied zu denen im Spektrogramm fast geradlinig aus. Das ist auf die Verkürzung der Dauer des analysierten Signals zurückzuführen. Durch einen Anstieg des Rechenaufwandes konnte aus dem ganzen Meßsignal der Dauer von  $T = 21$  s nur ein kurzer Abschnitt von  $t_1 = 1,1$  s bis  $t_2 = 2,42$  s mit der WVV ausgewertet werden. Im Bild 6 ist er links (vertikal) dargestellt. Für die Zeit von  $t_2 - t_1 = 1,32$  s trat darin nur ca. 1 Periode der Schwankung der Getriebedrehzahl auf.

Neben den Signaltermen enthält die WVV auch starke Interferenzen. Im Contour-Plot der WVV im Bild 6 können sie von Signaltermen kaum unterschieden werden, weil sie darin weder besondere Form noch Lage besitzen. Ein Mittel zu ihrer Erkennung gibt die Mittelung der WVV  $WVD_x(t;f)$  über die Zeit  $t$ . Dabei erhält man das Energiedichtespektrum. Interferenzen treten darin nicht auf, da ihre zeitliche Mittelung in der WVV im Unterschied zur Mittelung der Signalterme immer Null ergibt (Cohen, 1989; Mertins, 1996). Dieses Frequenzspektrum ist im Bild 6 unten dargestellt. Durch den Vergleich der Maxima darin mit den vertikalen Linien in der WVV kann festgestellt werden, welche Linien davon die Signal- und die Interferenzterme sind.

Wegen der auftretenden Interferenzen ist die WVV zur Bildung des Ordnungsspektrums schlecht geeignet. Nach der Umwandlung

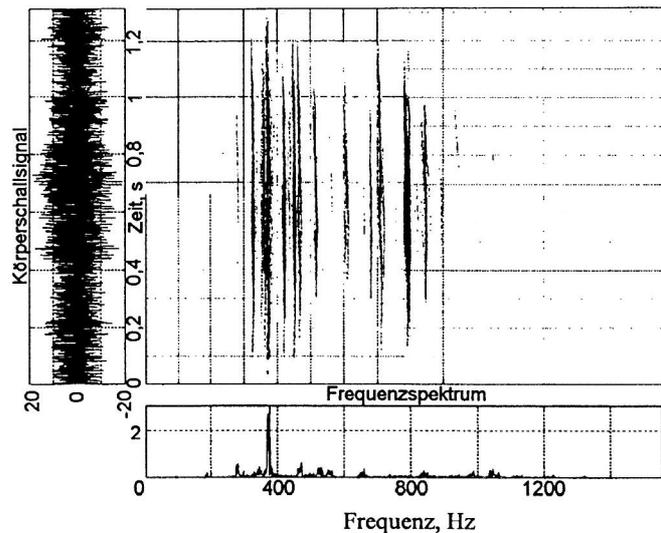


Bild 6. Wigner-Ville-Verteilung des Körperschallsignals am Zahnradgetriebe eines Ofenantriebs (in der Mitte) und das durch ihre Zeitmittelung berechnete Frequenzspektrum (unten)

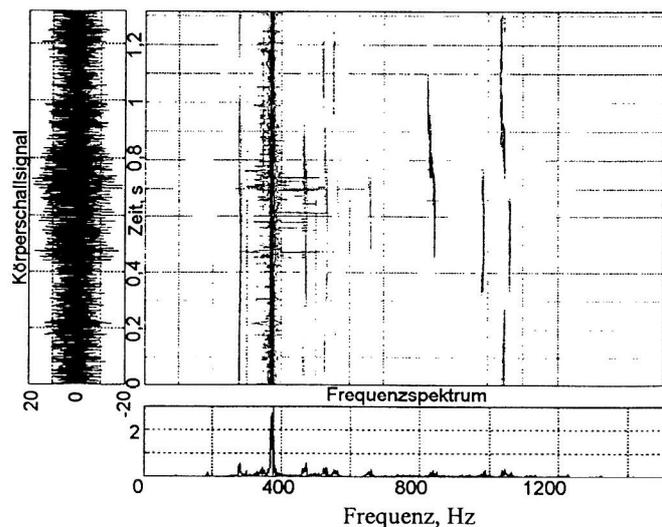


Bild 7. Choi-Williams-Verteilung des Körperschallsignals am Zahnradgetriebe eines Ofenantriebs (in der Mitte) und das durch ihre Zeitmittelung berechnete Frequenzspektrum (unten)

der WVV in die entsprechende ZOV werden die Interferenzen bei deren zeitlichen Mittelung nicht mehr entfernt.

Es sollen dafür andere ZFV mit reduzierten Interferenzen, z.B. die CWV, genutzt werden. Die CWV wurde nach der Formel (3) vom selben Abschnitt des Getriebesignals der Dauer von 1,32 s (wie die WVV) berechnet, wobei hier auch das Signal zunächst in seine analytische Form umgewandelt wurde. Das Contour-Plot der CWV ( $\sigma=0,1$ ) ist im Bild 7 (in der Mitte) dargestellt. Unten in diesem Bild ist das Frequenzspektrum dieses Signalabschnitts dargestellt. Es wurde durch die Zeitmittelung der CWV berechnet. Erwartungsgemäß fällt es mit dem Frequenzspektrum im Bild 6 zusammen, da sowohl CWV als auch WVV Randbedingungen erfüllen.

Die vertikalen Linien in der CWV im Bild 7 stellen wieder die Komponenten der Getriebebeschwingung dar. Darunter ist die stärkste Komponente der Zahneingriffsschwingung bei ca. 376 Hz. Die Interferenzterme wurden in der CWV stark unterdrückt und treten im Bild 7 fast nicht mehr in Erscheinung. Daher ist die CWV besser als die WVV für die Berechnung des Ordnungsspektrums geeignet.

Dieses Ordnungsspektrum ist im Bild 8b dargestellt. Es wurde nach der bereits für das Spektrogramm beschriebenen Methodik gebildet (s. Abschnitt 4.3). Im Bild 8a ist auch das Frequenzspektrum, das durch die zeitliche Mittelung der CWV gebildet wurde, dargestellt. Der Vergleich der beiden Spektren im Bild 8 zeigt wieder, daß das Ordnungsspektrum schmalere Maxima besitzt. Für die Diagnose ist es daher zu bevorzugen.

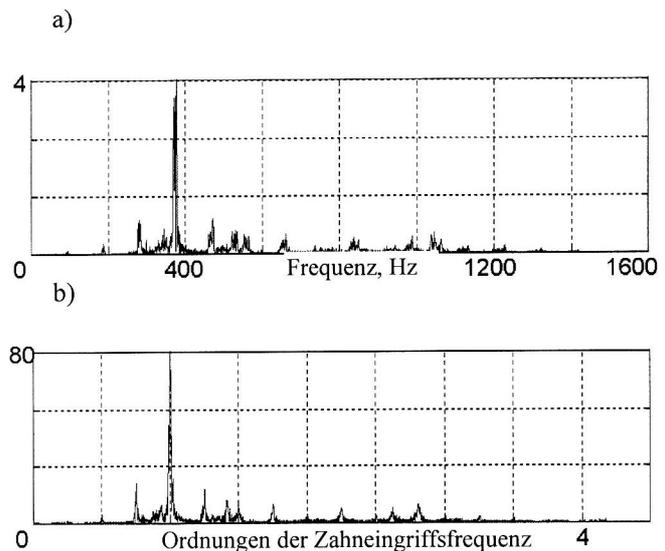


Bild 8. Frequenzspektrum (a) und Ordnungsspektrum (b) des Körperschallsignals am Zahnradgetriebe, die mittels der Choi-Williams-Verteilung berechnet wurden

## 5 Diskussion

Im Bild 2b sind zwei Verfahren zur Bildung des Ordnungsspektrums aus einem instationären Signal  $x(t)$  mit Hilfe der ZFV dargestellt. Das erste Verfahren ist die Umwandlung einer ZFV des Signals  $x(t)$  in die ZOV und ihre Mittelung weiterhin über die Zeit  $t$ . Es wurde bereits unter Nutzung des Spektrogramms (s. Abschnitt 4.3), der WVV und der CWV (Abschnitt 4.4) praktisch erprobt und erwies sich als erfolgreich. Dennoch sollen auch seine schwachen Stellen genannt werden. Diese sind eine niedrigere Auflösung des Ordnungsspektrums (beim Spektrogramm), das Auftreten von Interferenztermen (bei der WVV) oder ein größerer Rechenaufwand (bei der CWV).

Um diese Probleme zu vermeiden, kann ein anderer Ansatz zur Bildung des Ordnungsspektrums aufgrund der ZFV vorgeschlagen werden. Schematisch ist er im Bild 2b (der untere Zweig) dargestellt. Darin wird die ZFV wie früher zur Erkennung des zeitlichen Verlaufs einer drehzahlabhängigen Komponente in der Maschinenschwingung und zur Bestimmung der fehlenden Funktion der Veränderung des Drehwinkels einer Maschinewelle genutzt. Der Unterschied ist, daß mit Hilfe dieser Funktion danach eine neue winkeläquidistante Abtastung des bereits zeitäquidistant abgetasteten Schwingensignals  $x(t)$  durchgeführt wird. Die FT davon liefert anschließend das gewünschte Ordnungsspektrum.

Der Vorteil dieses Ansatzes ist, daß das Ordnungsspektrum nicht direkt aus einer ZFV sondern durch ein Signalresampling gewonnen wird. Daher beeinflussen die Nachteile der ZFV das resultierende Ordnungsspektrum nicht entscheidend.

An dieser Stelle soll auch eine dritte Möglichkeit dazu erwähnt werden. Sie besteht in der Synthese des Signals von der ZOV, nachdem sie aus der jeweiligen ZFV gebildet wurde. Für quadratische ZFV der Cohen-Klasse ist die Synthese allerdings nicht eindeutig und nur unter Nutzung komplizierter Optimierungsalgorithmen ausführbar (Cohen, 1989).

## 6 Zusammenfassung

Traditionell nutzen Diagnoseverfahren an rotierenden Maschinen die Fourier-Analyse gemessener Maschinenschwingungen. Während bei konstanten Drehzahlen das Frequenzspektrum oder -kepstrom dafür genutzt werden kann, ist die Zustandsbewertung bei einer Drehzahländerung nur aufgrund des Ordnungsspektrums bzw. -kepstroms möglich. Diese können jedoch nur von drehwinkeläquidistant abgetasteten Schwingensignalen gewonnen werden, was eine zusätzliche und präzise Messung der Drehfrequenz der Maschine benötigt.

Im Beitrag wurde ein anderer Ansatz konzipiert und erprobt, bei dem nur die ursprünglichen, durch einfache Meßgeber gewonnenen Schwingensignale zur Diagnose bei veränderlichen Drehzahlen genutzt werden. Da solche Signale instationär sind, wurde die ZFA zu ihrer Verarbeitung herangezogen.

Es wurden zwei Verfahren zur Bildung des Ordnungsspektrums aus instationären Maschinenschwingungen mit Hilfe der ZFV entwickelt. Das Erste war die Umwandlung einer ZFV in die ZOV und ihre zeitliche Mittelung. Gemäß dem zweiten Verfahren wurde ein ursprünglich gemessenes Signal in das winkeläquidistant abgetastete Signal umgebildet. In beiden Fällen wurde die ZFV dafür genutzt, den Zeitverlauf einer drehzahlabhängigen Komponente in der Maschinenschwingung zu ermitteln und dadurch die fehlende Funktion der Veränderung des Drehwinkels einer Maschinenwelle aus der instationären Schwingung zu gewinnen.

Zum Verifizieren wurde ein Verfahren praktisch realisiert und das Ordnungsspektrum einer Getriebeschwingung berechnet. Darin waren Maxima sichtbar schmäler als die im ursprünglichen Frequenzspektrum. Die Bedeutung dieses neuen Ansatzes ist, daß damit das Ordnungsspektrum eines Schwingensignals an instationär laufenden Maschinen gewonnen werden kann, ohne jeglichen Drehzahlgeber zu nutzen. Seine Implementation vereinfacht das Diagnosesystem, da der Drehzahlgeber an der rotierenden Maschine nicht mehr notwendig wird.

## Danksagung

Diese Arbeit ist vom Deutschen Akademischen Austauschdienst durch das Forschungsstipendium A/97/13553 gefördert. Ebenfalls danken wir Herrn Dr.-Ing. E.Becker für die Unterstützung mit dem experimentellen Material und die Beratung.

## Literatur

1. Braun, S.: Mechanical Signature Analysis. Theory and Applications, Acad. Press, (1986).
2. Choy, F.K.; Polyshchuk, V.; Veillette, R.J.; Braun, M.J.: Health monitoring of a gear transmission using acoustic signatures, Int. Journal of Turbo and Jet Engines, 14, (1997), 89-97.
3. Cohen, L.: Time-frequency distributions – a review, Proc. of the IEEE, 77, 7, (1989), 941-981.
4. Dalpiaz, G.; Rivola, A.: Fault detection and diagnostics in cam mechanisms, 2nd int. Conference "Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques", Senlis, France, Oct. 10-12, in Proc., vol.1, (1995), 327-338.
5. Forrester, D.: Time-frequency analysis in machine fault detection, in: Time-Frequency Signal Analysis – Methods and Applications, Ed. B. Boashash, Longman Cheshire, (1992), 406-423.

6. Ivanov Yu.Ye., Meltzer G.: Time-dependet cepstral analysis – it's significance and application in technical diagnostics, 3rd Int. Conference "Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques", Senlis, France, Oct. 13-15, in Proc., vol.1, (1998), 333-343.
7. Kolerus, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen, Sindelfingen: Expert-Verlag, (1995).
8. Lieske, D.: Selbsttätige akustische Prüfung von Automatikgetrieben in der Serienproduktion, 4. Kolloquium „Technische Diagnostik“, Dresden, 14.-15. März 1996, im Tagungsband, (1996), 488-497.
9. Mertins, A.: Signaltheorie, Stuttgart: Teubner, (1996).

---

*Anschrift:* Prof. Dr.-Ing. habil. G. Meltzer, Dr.-Ing. J. Iwanow, Technische Universität Dresden, Institut für Energiemaschinen und Maschinenlabor, Professur für Technische Diagnostik, D-01062 Dresden.