

Qualitätsprüfung von Elektroantrieben durch motorstromsynchroner Vibrationsanalyse

**Dipl.-Ing.(FH) Lothar Schmidt
Institut für Automatisierungstechnik
und Qualitätssicherung (iAQ)
an der Fachhochschule Heidelberg**

Einleitung

Die Art der Analyse, Auswertung und Verarbeitung von Meßsignalen hat sich in den letzten Jahren gewandelt. In der Vergangenheit wurden vorwiegend Methoden eingesetzt, die sich an der technischen Realisierbarkeit in Geräten oder Rechnern und an den wissenschaftlichen Erkenntnissen orientierten. Der Reiz lag gerade auf wissenschaftlicher Seite eher in der Herausforderung, die Problemlösung möglichst mit Anwendung einer neuen Methode zu finden. Jeder moderne Begriff aus dem Bereich der Signal-, Muster- und Informationsverarbeitung stieg wie ein Stern auf, um schnell wieder zu verblassen, wenn man die Grenzen der Methoden erfahren hatte oder ein neuer Komet erscheint. Da sind als Beispiele die Expertensysteme, neuronalen Netze, Fuzzy Logik und ähnliches zu nennen. Alle Verfahren haben Ihre Berechtigung in geeigneten Anwendungen und leisten dort gute Arbeit.

Seit mehreren Jahren gibt es bei der Entwicklung von Lösungen zur Analyse, Auswertung und Verarbeitung von Meßsignalen eine stärkere Fokussierung auf das Problem. Bestimmt wird dieser Wandel durch die technischen Möglichkeiten der Modellierung und Simulation. Zunächst wird dabei vom zu untersuchenden realen Objekt abstrahiert und ein Modell formuliert. Information, die verfügbar ist, wird genutzt. Am Beispiel der Elektroantriebe gibt es konstruktionsbedingt eine ganze Reihe von Abhängigkeiten. Der Aufbau des Motors bestimmt die Leistungsdaten. Die Drehzahl des Motors sowie Art der Getrieberäder und Aufbau des Getriebes sind maßgeblich für die Drehzahl des Abtriebes. Ähnliche Zusammenhänge gelten für Kommutierung, für die Lager und andere mechanisch gekoppelten Elemente. Die Modellierung greift diese Zusammenhänge auf und bildet ein abstrahiertes Modell, das diese Zusammenhänge berücksichtigt.

Bei der drehzahlsynchronen Ordnungsanalyse nutzt man solche Zusammenhänge aus, um Rückschlüsse auf die Funktion und Qualität der Elektroantriebe zu ziehen. Abweichungen zwischen Modell und realem Verhalten ermöglichen die Diagnose von Zuständen und das Auffinden von Störungen oder Fehlern. Dabei wird der aktuelle Drehwinkel des Motors zugrunde gelegt. Herkömmlich liefert ein Winkelgeber diese Information. Nachfolgend wird dargelegt, wie ohne zusätzlichen Sensor allein durch Auswertung des Motorstromes oder eines Vibrationssignales eine Ordnungsanalyse der Schwingungen erfolgen kann.

Ordnungsanalyse von Schwingungen

Um die Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Frequenzanteilen eines Signals zu kennzeichnen, werden die Verhältnisse zwischen deren Signalfrequenz und einer festgelegten Grundfrequenz bestimmt. Ergeben sich ganzzahlige Verhältnisse, so spricht man von Harmonischen der Grundfrequenz. Entspricht die Grundfrequenz der Drehfrequenz eines drehenden Teiles wie z.B. der Drehfrequenz eines

Motors, so spricht man von der ersten Ordnung. Der Frequenzanteil, der der zweifachen Drehfrequenz entspricht, heißt 2. Ordnung usw.. Die erste Harmonische eines Signals ist somit gleich der 2. Ordnung.

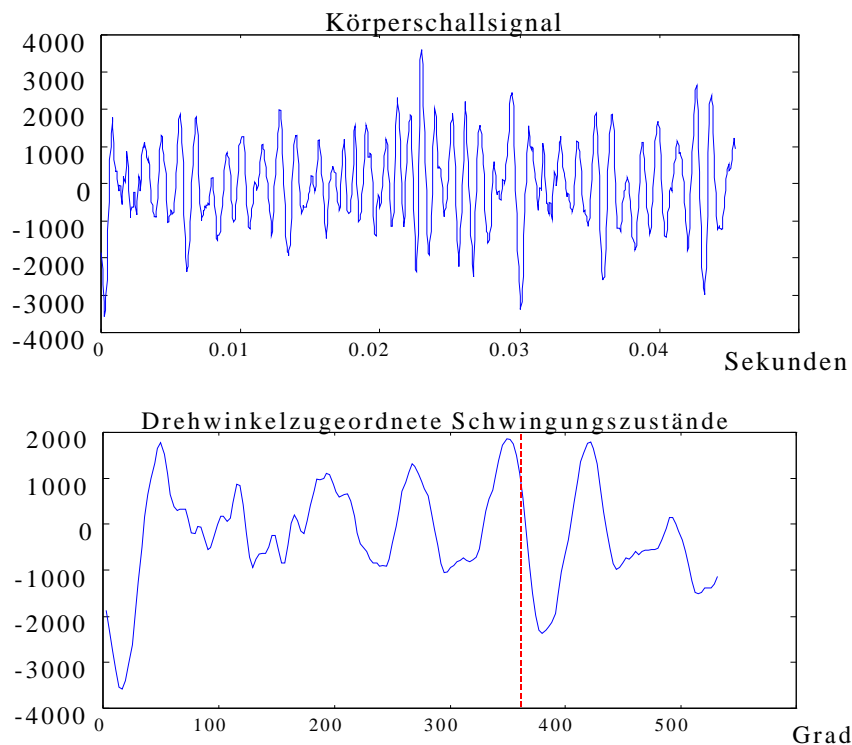


Bild 1: Körperschallsignal eines Elektroantriebes oben mit zeitsynchroner und unten mit winkelsynchroner Abtastung

Eine eingeführte Methode um akustische Signale auszuwerten, ist die Fourieranalyse bzw. bei digitaler Verarbeitung die Fouriertransformation, mittels derer das Signal aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert wird. Eine Beurteilung der Frequenzanteile eines Signals kann eine Aussage ermöglichen, was niederfrequente Modulationen, Rasseln, Klirren und ähnliches angeht. Die digitale Verarbeitung von Signalen setzt allerdings eine Abtastung voraus. Bei Wahl einer festen Abtastfrequenz, ist der zeitliche Abstand zwischen den diskreten Signalwerten konstant. Die Transformation in den Frequenzbereich liefert somit ein Spektrum mit konstanten Frequenzabständen.

Wählt man für die Abtastung der Signale statt der unabhängigen Variablen „Zeit“ eine andere Bezugsvariable, so wird das zeitsynchrone Tastsignal durch ein Tastsignal ersetzt, dessen Synchronitätsbedingung prozeßabhängig ist. Gebräuchlich ist dabei die unabhängige Variable „Drehwinkel“. Man spricht dann auch von winkelsynchroner Abtastung. Die einzelnen Schwingungszustände werden einem festen Drehwinkel zugeordnet (Bild 1).

Durch den Drehwinkelbezug erreicht man eine unmittelbare Zuordnung zu den geometrischen oder funktionalen Verhältnissen innerhalb der zu untersuchenden Objekte. In Bild 1 ist oben das zeitlich äquidistant und unten das winkelsynchron abgetastete Körperschallsignal eines Elektroantriebes dargestellt. Zu erkennen ist, daß die ersten fünf relativen Maxima des zeitlichen Verlaufes zu einem Drehwinkel von 360° gehören. Ändert sich die Drehfrequenz des Elektromotors, so verschieben sich die relativen Maxima zeitlich zueinander. Bei einer Erhöhung der Drehzahl werden die Abstände kleiner und bei einer Erniedrigung größer.

Im Gegensatz dazu bleiben bei der winkelsynchronen Abtastung alle Signalstrukturen, die drehzahl- bzw. drehwinkelabhängig sind, in ihren absoluten Lagen zueinander konstant. In Bild 2 ist ein Beispiel

für die drehzahlabhängige Änderung eines Schwingungssignals dargestellt. Eine kontinuierliche Erhöhung der Drehzahl verschiebt die Frequenzanteile entsprechend der strahlenförmig vom Ursprung ausgehend eingezeichneten Geraden.

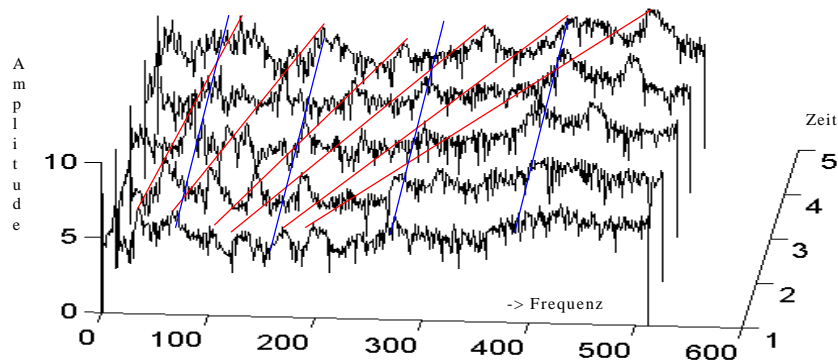


Bild 2: Campbell-Diagramm der Schwingungen eines Elektroantriebes bei kontinuierlicher Drehzahländerung

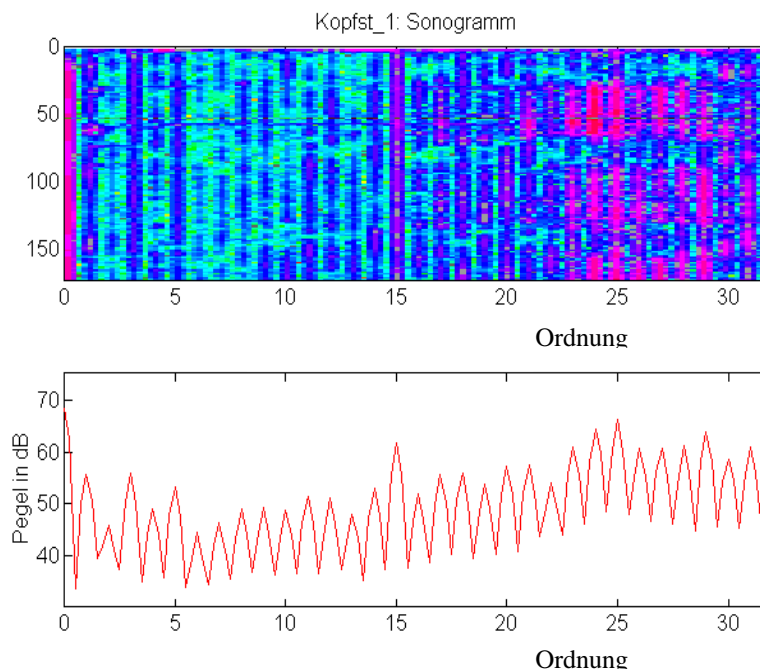


Bild 3: Ordnungssonogramm (oben) und über mehrere Umdrehungen eines Elektroantriebes gemittelt Ordnungsspektrum

Ersetzt man die zeitlich äquidistante Abtastung durch die winkeläquidistante Abtastung und wendet man auf die so gewonnenen Daten die Fouriertransformation an, so gewinnt man ein Spektrum, das die Signalanteile über der Ordnung darstellt. Bild 3 zeigt das Schwingungssignal aus Bild 2 derartig analysiert. Im oberen Teil des Bildes ist die zeitliche Abfolge der einzelnen Ordnungsspektren übereinander dargestellt. Die Schwärzung der Bildpunkte ist dabei ein Maß für die Leistung des

Signalanteils. Man erkennt, daß die ehemals schräg verlaufenden Anteile (Bild 2) nun alle parallel zueinander und zur Zeitachse verlaufen. Summiert man nun alle Ordnungspektalanteile über der Analysezeit, so ergibt sich daraus ein Summenspektrum, das die drehfrequenzabhängigen Anteile deutlich hervorbringt, nicht-drehzahlsynchrone Anteile unterdrückt.

Diesem Vorteil der Trennung drehzahlsynchroner und nicht-synchroner Anteile steht der Nachteil des höheren technischen Aufwandes gegenüber. Der Drehwinkel muß herkömmlich durch Ankopplung eines externen Drehwinkelgebers gewonnen werden, um ihn zur Erzeugung des Abtastsignals zu nutzen.

Motorstrom als Taktsignal

Während des Betriebes eines Antriebes mit Gleichstrommotor laufen die Bürsten über den Kollektor. Durch die Kommutierung wird der Motorstrom moduliert. Bild 4 zeigt beispielhaft die Wechselanteile des Stromsignals eines Gleichstromantriebes mit 12 Ankernuten bei einer Drehfrequenz von ca. 50 Hz. Neben den periodischen Anteilen, die unmittelbar der Periode der Kommutierung entsprechen sind höherfrequente Signalanteile überlagert.

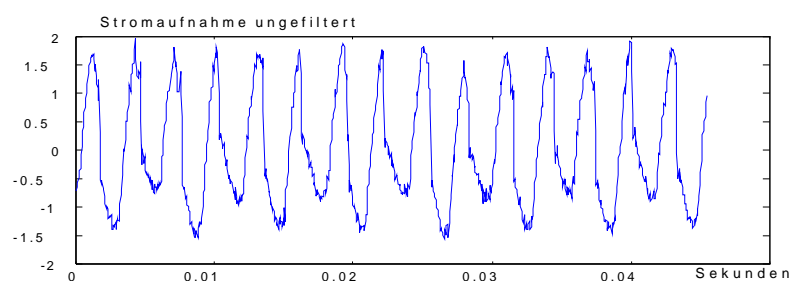


Bild 4: Wechselspannungsanteil des Motorstromsignals

Bereitet man den Wechselanteil des Motorstromes auf, so läßt sich aus der zeitlichen Periodizität ein Taktsignal ableiten. Bei einer primären Abtastrate von 44100 Samples/Sekunde und einer Drehzahl von 50 Hz entsprechen 882 Samples einer Motorumdrehung. Die Winkelauflösung ist somit $0,4^\circ$. Läßt man bei der Drehwinkelschätzung einen maximalen Winkelfehler von 10 % zu, der dem kleinsten auflösbaren Winkelschritt von $0,4^\circ$ entspricht, so folgt daraus eine Teilung des Drehwinkels in Schritte von 4° . Dieser Winkeltakt von 4° wird zur Unterabtastung eines hochaufgelösten Schwingungssignals verwendet. Damit umfaßt der Datenblock einer Umdrehung 88 Abtastwerte. Die Unterabtastung entspricht damit dem Faktor 1/10.

Diagnose von Antriebsfehlern

Die Auswertung des Motorstromsignals ermöglicht die Erkennung von Fehlern im Laufverhalten sowie ihre Zuordnung zu Motoreigenschaften. Bild 5 zeigt am Beispiel eines Verstellantriebes, der über ein Ritzel und mittels einer Zahnstange ein Gestänge verschiebt, den Verlauf der Drehzahl über dem zurückgelegten Weg, hier als Anzahl erfolgter Umdrehungen dargestellt. Man erkennt eine deutliche Drehzahländerung nach ca. 10, 70 und 130 Umdrehungen also jeweils im Abstand von 60 Umdrehungen.

Zieht man die antriebsspezifischen Konstruktions- und Funktionsdaten hinzu, so läßt sich als Fehlerquelle das Schneckenrad des Getriebes ausmachen, denn es dreht sich dreimal über dem zurückzulegenden Weg der Zahnstange. Die annähernd formgleiche Kurve der Drehzahl deutet darauf

hin, daß die Ursache der Drehzahlschwankung eine Formabweichung (Unrundheit) des Schneckenrades sein muß, die eine winkelabhängige Laständerung bewirkt.

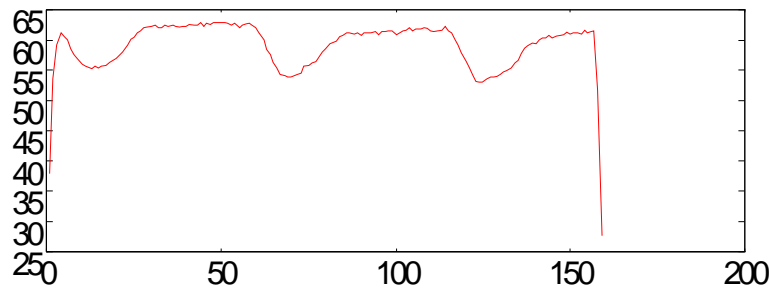


Bild 5: Drehzahl des Elektroantriebes 1 aufgetragen über den zurückgelegten Umdrehungen (155 Umdrehungen entsprechen dem Gesamtweg)

Eine Auswertung des winkelsynchron abgetasteten Schwingungssignals des Antriebes zeigt (Bild 6), daß sich in den Abschnitten der Drehzahländerung auch das Klangbild des Antriebes deutlich ändert. Am deutlichsten ist dies zwischen der 15 und 30 Ordnung nach den o.g. Umdrehungen zu sehen.

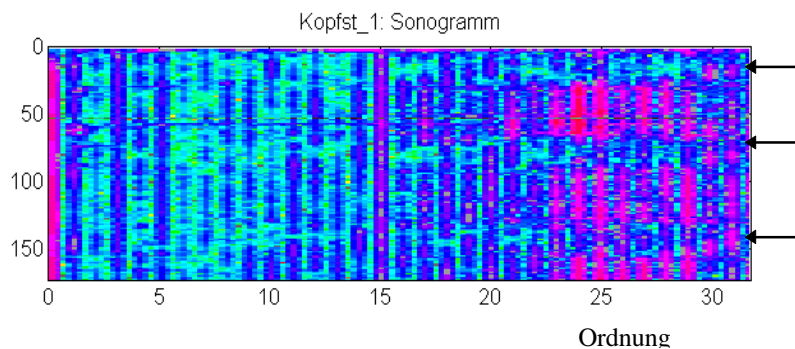


Bild 6: Ordnungssonogramm des Vibrationssignals des Antriebes mit Drehzahlschwankungen (vertikal aufgetragen: Anzahl erfolgter Umdrehungen)

In Bild 7 ist ein weiteres Beispiel dargestellt. Nach ca. 75 Umdrehungen sinkt die Drehzahl monoton ab. Nach 100 Umdrehungen hat die Kurve ihr Minimum, steigt dann wieder an, erreicht aber das alte Drehzahlniveau nicht mehr. Bei ca. 155 Umdrehungen fährt das Ritzel in den Anschlag der Zahnstange und die Drehzahl des Motors sinkt auf 0 ab.

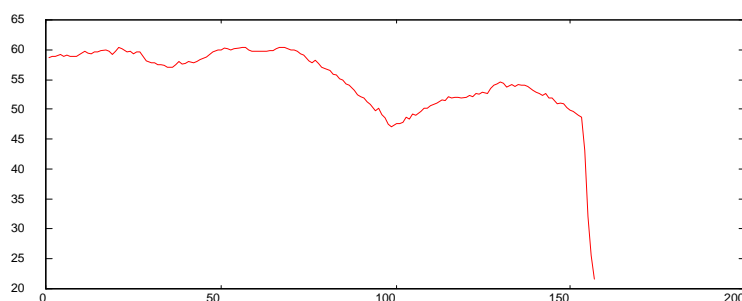


Bild 7: Drehzahl des Elektroantriebes 2 aufgetragen über den zurückgelegten Umdrehungen (155 Umdrehungen entsprechen dem Gesamtweg)

Diese Änderung ist bei Vergleich mit den Konstruktionsdaten nicht auf Eigenschaften des Motors oder Getriebes zurückzuführen. Ursache für diese erhebliche Drehzahländerung sind Formfehler der Zahnstange.

Ein weiteres Beispiel für die Änderung der Drehzahl, die aus dem Wechselanteil des Stromsignals ermittelt wird, zeigt Bild 8. Es handelt sich um einen Fensterheber-Antrieb, bei dem 72 Umdrehungen des Motorankers einer Umdrehung des Schneckenrades entsprechen. Man erkennt eine periodische Absenkung der Drehzahl nach jeweils 36 Umdrehungen. Es liegt also ein Einfluß vor, der auf die halbe Umdrehung des Schneckenrades zurückzuführen ist. Auch in diesem Fall lag ein Formfehler des Schneckenrades vor.

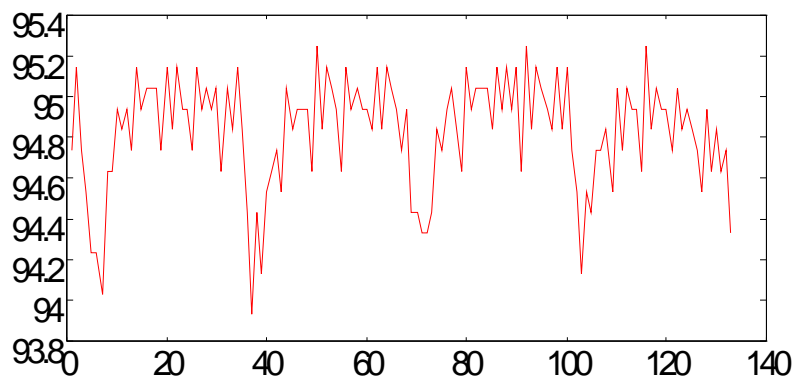


Bild 8: Drehzahlverlauf eines Fensterheberantriebes aufgetragen über den zurückgelegten Umdrehungen

Diagnose von Vibrationsmustern

Eine winkelsynchrone Analyse der Vibrationssignale eröffnet die Möglichkeit, konstruktive Eigenschaften als Fehlerursache zu diagnostizieren. In Bild 9 ist das Vibrationssignal eines lauten Elektroantriebes über einer Umdrehung dargestellt. Der mittlere Verlauf des Vibrationssignals ist annähernd waagrecht. Lediglich zwischen 0 und 200° sind die Signalauslenkungen größer als im weiteren Winkelbereich. Die hohen Amplitudenwerte zeugen von einer hohen Schwingungsanregung und führen zu der Beurteilung „laut“.

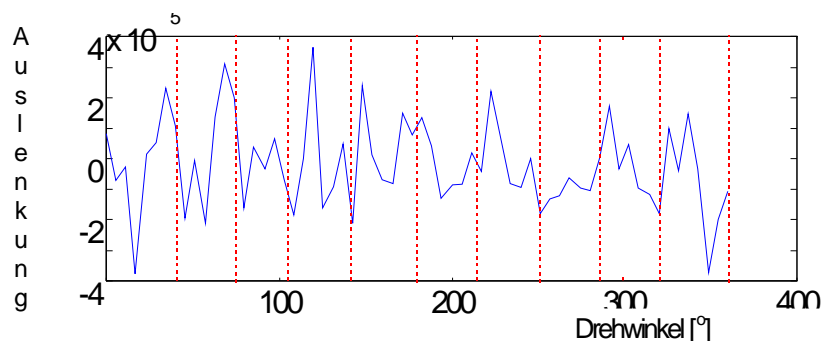


Bild 9: Vibrationssignal eines lauten Elektroantriebes aufgetragen über einer Umdrehung

Im Gegensatz dazu zeigt der Verlauf in Bild 10 eine deutliche additive tieffrequente Signalkomponente, die etwa dem Kurvenverlauf einer Kosinus-Halbwellen entspricht. Die Auslenkungen des

Vibrationssignale sind aber über den gesamten Winkelbereich deutlich geringer als bei dem lauten Antrieb. Die Ursache des tieffrequenten Anteils ist eine Unwucht des Ankers.

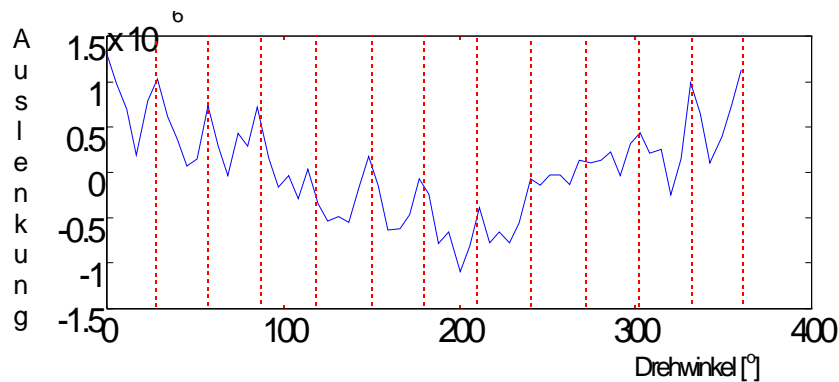


Bild 10: Vibrationssignal eines Elektroantriebes mit Unwucht aufgetragen über einer Umdrehung

In Bild 11 ist der Verlauf des Ordnungs-Sonogramms des unwuchtigen Elektroantriebes über ca. 255 Umdrehungen dargestellt. Aus der kosinusförmigen Komponente (siehe Bild 10) resultiert die starke erste Ordnung. Ebenfalls hervorstechend sind die Linien beider 12. und 24. Ordnung. Dies hängt mit der Kommutierung des Motors zusammen. Bedingt durch die 12-fache Kollektorteilung ergibt sich die 12. Ordnung sowie die dazu harmonische 24. Ordnung.

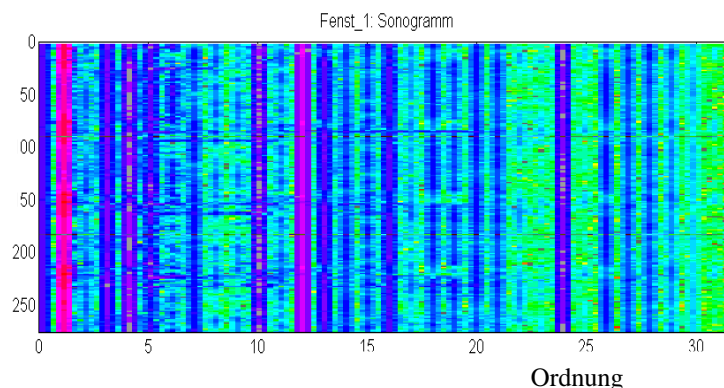


Bild 11: Ordnungs-Sonogramm des Vibrationssignals des Elektroantriebes mit Unwucht

Die Ordnungsanalyse ermöglicht die Auswertung auch zeitlich stark veränderlicher Signale. So wurde bei den nachfolgend dargestellten Beispiele die Grunddrehzahl in einem kurzen Zeitraum variiert. In Bild 12 ist das Frequenz-Sonogramm eines Motorhochlaufes und darin die deutlich parabelförmig ausgeprägte Linienstruktur zu sehen. Die Linien behalten auch bei Erhöhung der Drehzahl ihre relativen Abstände zueinander. Die Verhältnisse der Linienfrequenzen sind konstant.

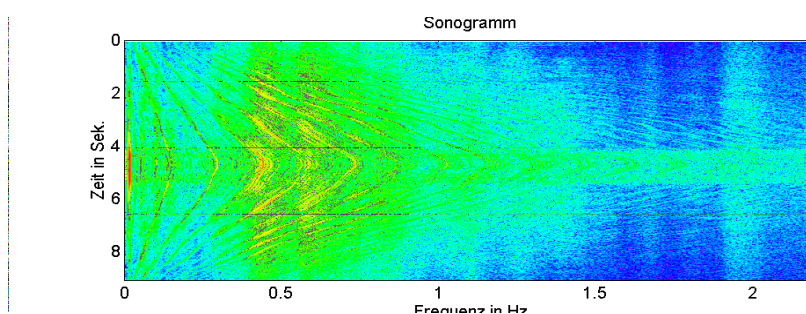
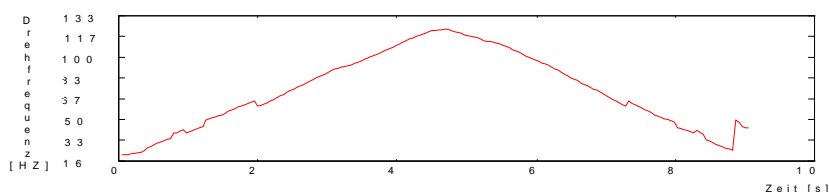
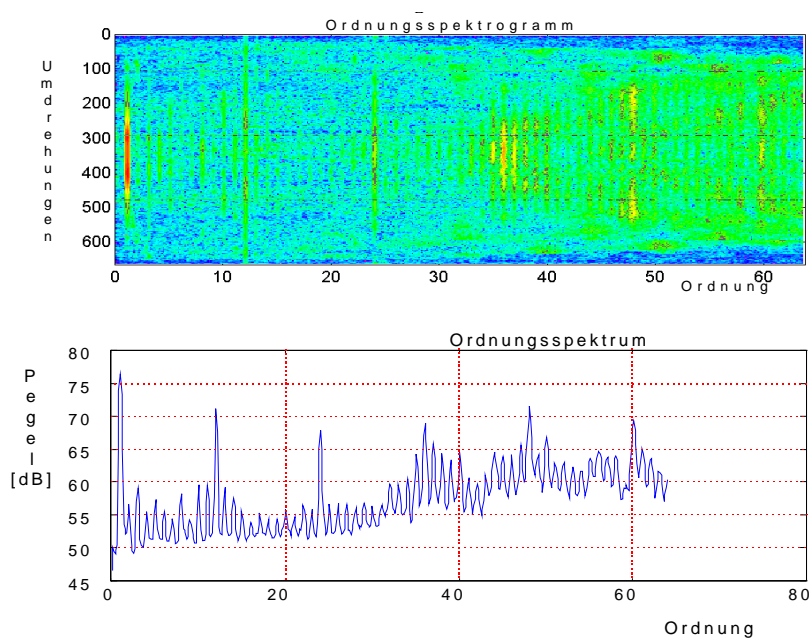


Bild 12: Frequenz-Sonogramm der Vibration eines Elektroantriebes**Bild 13:** Verlauf der Drehzahländerung ermittelt aus dem Motorstrom

Die Auswertung der Motorstromänderung liefert den zeitlichen Verlauf der Drehzahl (Bild 13). Die daraus abgeleitete drehzahlsynchrone Unterabtastung und anschließende Ordnungsanalyse glättet die parabelförmigen Linienvläufe (Bild 14 oben). Nach der ordnungsbezogenen Normierung des Vibrationssignals ist eine Summation über alle Ordnungspektrogramme und damit eine zuverlässigere Trennung von drehzahl- und nicht-drehzahlsynchronen Anteilen möglich. Bild 14 (unten) zeigt ein solches Summen-Ordnungsspektrum. Die 1, 12, 24, 36, 48 und 60 Ordnung lassen sich deutlich von den übrigen Anteilen trennen und zur Diagnose heranziehen.

**Bild 14:** Ordnungsspektrogramme (oben) und Summenspektrum (unten) von dem Vibrationssignal bei zeitlich stark veränderlicher Drehzahl

Zusammenfassung

Die Erfassung und Analyse des Wechselanteils des Motorstroms von Elektroantrieben erlaubt einerseits die winkelsynchrone Analyse und Auswertung von Signalen und die darauf aufbauende Diagnose zur Ermittlung von Störungen und Fehlerursachen. Die Kommutierung moduliert das Stromsignal so stark, daß auf einfache Weise der Winkelbezug sowie die Drehzahl ermittelt werden können. Form- und Verlaufsänderungen der Signale lassen sich zur Rekonstruktion der Fehler heranziehen. Die

Interpretation der so gewonnenen Signale ist aber nur dann aussagekräftig, wenn genau Kenntnisse über die zu messenden Objekte vorliegt.

Die Verknüpfung zwischen trennungsscharfer Auswertetechnik und dem Expertenwissen erlaubt eine zielgerichtete Diagnose.

