

# Anwendungsbeispiel

## Hüllkurvenanalyse zur effektiven Ermittlung von Wälzlagerfehlern – Wirklichkeit oder Fiktion?

In der jüngeren Vergangenheit gab es gegensätzliche Meinungen über die Hüllkurvenanalyse, einer Technik zur Diagnose von Wälzlagerdefekten. Diese Meinungen gehen von einem Extrem zum anderen – entweder wird die Hüllkurvenanalyse als nutzlos bezeichnet oder sie wird als „der“ Standard für die Beurteilung von Wälzlagern gepriesen. In diesem Artikel bringt ein anerkannter Experte die Anwendung von Hüllkurvenanalysen zur Maschinenzustandsüberwachung in einen gemeinsamen Kontext und eröffnet ein neues Feld der Anwendung.

### Einleitung

Die Hüllkurvenanalyse, manchmal auch als „Amplitudendemodulations-Verfahren“ bezeichnet, ist eine sehr bekannte Signalverarbeitungstechnik im Bereich der Elektronik und Telekommunikation.

In den 80er Jahren begann man, die Technik in der Maschinenüberwachung vorwiegend zur Fehlerdetektion und Diagnose Wälzlager einzusetzen. Auf Grund der technologischen Weiterentwicklung der digitalen Signalanalyse ist es möglich geworden, diese Überwachungstechnik in kostengünstige, bedienerfreundliche Feldmessgeräte zu implementieren. Dadurch wurde die Hüllkurvenanalyse zu einem sehr populären Werkzeug beim Wartungs- und Instandhaltungspersonal.

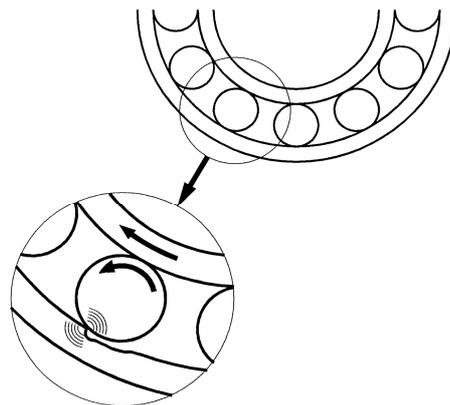
Die Hüllkurvenanalyse nutzt die vom Wälzlager ausgehenden Anteile im Schwingungssignal aus, die durch innere Reibungskräfte entstehen. Im Normalzustand (fehlerfreies Wälzlager) regen diese Kräfte eine breitbandige Schwingung mit gleichmäßig verteilten Amplituden an. Diese Kräfte werden durch die Oberflächenqualität und den Zustand der Schmierung beeinflusst. Wenn sich ein Defekt entwickelt, wird die zuvor gleichmäßige verteilte Schwingung durch periodische Änderungen in den Kräften zusätzlich amplitudenmoduliert. Diese Modulationen werden durch Änderungen der Reibungsverhältnisse, des Druckes an den Lageroberflächen oder durch sich wiederholende Stoßkräfte aufgrund von lokalen Oberflächenstörungen hervorgerufen. Das bedeutet:

Amplitudenmodulation durch zufällige Reibungskräfte, überwiegend durch Montagefeh-

ler, radiale Spannungen oder Lagerversatz verursacht.

Amplitudenmodulation aufgrund von struktureller Resonanz, angeregt durch sich wiederholende periodische Stöße. Dies tritt bei lokalen Defekten an den Laufingflächen oder Wälzkörpern auf, z.B. im Fall von Einkerbungen oder Rissen.

Amplitudenmodulation von deterministischen Frequenzen (reiner Ton), d. h. charakteristische Frequenzen anderer Maschinenteile (Zahneingriffsfrequenz, Schaufelpassierfrequenz, usw.), durch Lagerfrequenzen.



*Bild 1: Ein Defekt am Außenring erzeugt einen Stoßimpuls, der sich durch die Lagerkomponenten und die Maschinenstruktur ausbreitet.*

In einem Hüllkurvenspektrum werden gleichermaßen Amplitudenmodulationen durch modulierende Kräfte (geometrische Fehler) und zufällig stationär ansteigender Kräfte, bedingt durch Änderungen der Reibung (Schmierungsprobleme), sichtbar (Es ist zu beachten,

dass sie auch im Original-Spektrum vorhanden sind, jedoch deutlich schwerer zu extrahieren und zu erkennen.)

Auf die Wälzlagerdiagnose bezogen, kann der Prozess der Hüllkurvenanalyse wie folgt beschrieben werden:

Auswahl eines Frequenzbereiches im Schwingungsspektrum, innerhalb dessen die Amplitudenmodulationen sichtbar sind, bzw. innerhalb dessen sie erwartet werden können. Alle Anteile außerhalb des Bandes werden entfernt. Dies geschieht unter der Annahme, dass die extrahierten Frequenzanteile nur auf Lagerschäden und nicht auf andere Maschinenfehler bezogen sind.

Gleichrichtung des verbleibenden Signals (Träger), und Ermittlung der Hüllkurve (die, den Modulationseffekt repräsentiert). Letzteres wird einer erneuten Analyse (FFT) im unteren Frequenzbereich unterzogen, um die Modulationsfrequenz(en) zu ermitteln.

Die Grundprinzipien der Hüllkurvenanalyse sind definiert und werden auch akzeptiert. Kommt es jedoch zu einer Diskussion über den Einsatz der Hüllkurvenanalyse zur Ermittlung von Wälzlagerschäden, kommen unterschiedliche Meinungen zutage. Diese können grundsätzlich in vier Gruppen eingeteilt werden:

- Die Hüllkurvenanalyse funktioniert, jedoch nur selektiv und bezogen auf hochfrequente Strukturresonanzen.
- Die Hüllkurvenanalyse funktioniert, jedoch nur selektiv und außerhalb von Strukturresonanzen, wo das Frequenzspektrum flach ist.
- Die Hüllkurvenanalyse funktioniert, ohne Selektion, innerhalb eines breiten, mittleren Frequenzbereiches.
- Die Hüllkurvenanalyse funktioniert nicht.

**Selektive Hüllkurvenanalyse im Bereich hochfrequenter Strukturresonanzen**

Diese Methode stützt sich auf die Vorstellung, dass ausschließlich lokale Wälzlagerfehler von Interesse sind, und dass die Hüllkurvenanalyse deshalb nur selektiv im Bereich hochfrequenter Strukturresonanz eingesetzt werden sollte (siehe 'Einleitung' Punkt 2). Durch die ausschließliche Auswahl hochfrequenter Strukturresonanzen wird es einfacher, störende Einflüsse anderer Quellen (z. B. Zahneingriff,

Schauelpassierfrequenz, elektrische Kräfte) und der dadurch zusätzlich überlagerten Modulationseffekte zu vermeiden.

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass das System unempfindlicher für gelegentlich auftretende, reibungsbedingte Modulation ist, die beispielsweise durch ungleiche radiale Spannung, Versatz oder Schlupf der Wälzkörper erzeugt werden. Das Argument, um diesen Nachteil zu relativieren ist, dass andere Quellen für reibungsbedingte Modulation, anders als solche, die durch Stöße erzeugt werden, deutlich im niederfrequenten Bereich des einfachen FFT-Spektrums sichtbar sind. Schmierungsprobleme sind beispielsweise – auch ohne Modulationseffekt – klar in einem breitbandigen Anstieg der Amplituden (Rauschanstieg) im einfachen FFT-Spektrum zu erkennen..

Diese Methode ist die gebräuchlichste auf diesem Gebiet. Üblicherweise werden Techniken zur Zustandsüberwachung zunächst dazu eingesetzt, mögliche Resonanzeregungen durch lokale Lager-defekte hervorzuheben. Die Hüllkurvenanalyse wird anschließend genutzt, die Ursache des Defekts zu benennen.

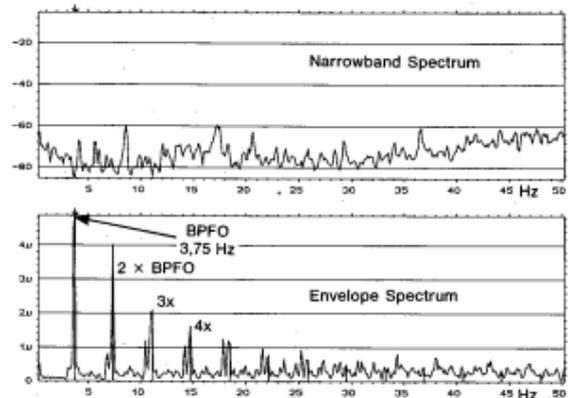


Bild 2: Vergleich zwischen einem normalen FFT-Spektrum und einem Hüllkurvenspektrum. Das schmalbandige Spektrum eines Lagers mit einem Defekt im Außenring (oben) zeigt keinerlei Anzeichen eines Fehlers. Die untere Darstellung zeigt ein Hüllkurvenspektrum des gleichen Signals.

**Selektive Hüllkurvenanalyse außerhalb des Bereichs von Strukturresonanzen**

In einer weiteren Methode, im Gegensatz zur vorherigen, wird die Hüllkurvenanalyse außerhalb des Bereiches durchgeführt, in dem direkte Resonanzen sichtbar sind. Das Spektrum ist hier relativ flach, zeigt also keine starken Amplitudenüberhöhungen. Hier ist das Argument,

dass damit jegliche Verzerrung durch eine Strukturresonanz vermieden wird. Das erlaubt eine ‚unverfälschte‘ Darstellung der Kräfte und Modulationen. Infolgedessen können alle Fehlerarten quantitativ mit Indikatoren wie ‚Modulationstiefe‘ (Unterschied zwischen einem harmonischen Pegel und dem Rauschpegel) und der harmonische Gehalt des Hüllkurvenspektrums bestimmt werden.

Dies ist eine sehr attraktive Methode, auch wenn es in einer komplexen Struktur wie einer Maschine schwierig erscheint, einen Frequenzbereich ohne Resonanz- oder Gegenresonanzanteil zu identifizieren. Jedoch wurde sie erfolgreich in Russland eingesetzt, wo Experimente an zahlreichen Lagern Methoden aufgedeckt haben, um zwischen unterschiedlichen Fehlerarten und dem Grad der Schädigung zu unterscheiden.

### Breitbandige Hüllkurveanalyse

Während die ersten beiden Methoden Messdaten „verarbeiten“, die unmittelbar oder zumindest mittelbar im Bereich von Strukturresonanz gemessen wurden, braucht die folgende dritte Methode dies nicht.

Zunächst wählt man einen mittleren Frequenzbereich aus, wobei es eine gute Vorgabe ist, die untere Frequenzecke beim 4- bis 5-fachen der höchsten Wälzlagerschadensfrequenz zu setzen. Die obere geht dann hoch bis zu 10 kHz. In der Theorie wird dieses breite Band den Bereich abdecken, in dem sich alle natürlichen Resonanzfrequenzen des Wälzlagers und des Weiteren die meisten Lagerstörungen selbst befinden. Der gewählte Frequenzbereich hängt von der Maschinendrehzahl ab. Nicht, weil die Eigenfrequenzen des Lagers direkt von der Maschinendrehzahl abhängen, sondern weil die Größe des Lagers von ihr abhängt, und deshalb folgerichtig auch die Resonanz von der Größe des Lagers.

Der Vorteil in der Verwendung der Eigenfrequenzen der Lagerelemente ist, dass sie im Gegensatz zu den hohen Strukturresonanzen, die empfindlicher bezüglich Stöße sind, bereits durch gelegentliche Modulationskräfte, angeregt werden. Ein Nachteil ist, dass es in der Natur der Sache liegt, dass in diesem mittleren Frequenzbereich in der Regel zusätzlich Eigenfrequenzen anderer Maschinenkomponenten zum liegen kommen – z. B. Zahneingriffsfrequenzen, Schaufelpassierfrequenzen. – und diese werden der Reihe nach durch benachbarte Elemente einschließlich der Lagerfrequenzen amplitudenmoduliert. Es gibt jedoch Untersuchungen zum Einsatz von zusätzlicher

Signalverarbeitung, wie ‚selbst-anpassungsfähige Rauschunterdrückung‘, um solche Effekte zu trennen.

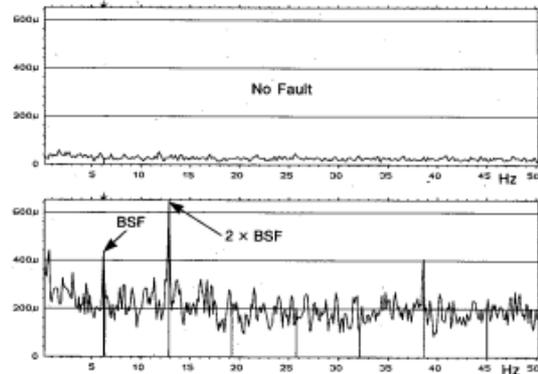


Bild 3: Hüllkurvenspektren eines gesunden (oben) und eines geschädigten Lagers (unten), die zeigen, wie das Hüllkurvenspektrum nur Spitzen (peaks) zeigt, wenn ein Fehler auftritt.

### Hüllkurvenanalyse – gut vermieden!

Mit dem Anstieg der Popularität der Hüllkurvenanalyse stieg auch das Ambitionsniveau derer, die sie anwandten. Man versuchte aus der Hüllkurvenanalyse skalare Größen abzuleiten, die im Trend dargestellt das Phänomen verdeutlichen. Empirische Algorithmen, die auf statistischen Daten basieren, wurden auch in der Bemühung entwickelt, absolute Grenzwerte abzuleiten. Im Versuch, selbst die Notwendigkeit der Beobachtung von Veränderungen im Trend zu eliminieren, wurden spezifische Größen definiert, mittels derer der Wälzlagerzustand aufgrund einer Einzelmessung beurteilt werden können soll.

Bis dahin ist es aber ein riesiger Sprung! Die Natur des Signalübertragungsweges, die Unterschiede, die unter Maschinen der gleichen Art gefunden wurden und die Natur der eingesetzten (Signal-) Verarbeitungstechnik machen es grundsätzlich schwer, einen repräsentativen absoluten Vorgabewert zu quantifizieren. Selbst wenn die Natur des Übertragungsweges die Interpretation nicht verkomplizieren würde, liegt es in der Natur der Fehler selbst, dass Entscheidungen in der Instandhaltung schwierig bleiben. Was zum Beispiel ist gefährlicher? - eine große Eindrückung oder ein kleiner Querriss in einer Lauffläche? Ersteres produziert mehr Modulationsenergie, kann jedoch lange Zeit halten, wenn die Schmierung ausreichend ist; letzteres kann zu jeder Zeit einen Laufringkollaps verursachen!

Die Konsequenzen sind sehr tiefgründig. Fehlerhafte Diagnosen und daraus folgende Fehler



in der Beurteilung untergraben die Hüllkurvenanalyse ernsthaft, und entfernen diese Technik weiter von ihren Skeptikern. Hinzu kommt noch, dass die Frage ‚Wegsensor oder Beschleunigungssensor‘ die Situation noch verworrener macht.

Einige der Hauptargumente für die Gültigkeit der Demodulationstechnik stützen sich tatsächlich mehr auf die Vorzüge der Wellenversatz-Messung, als auf Schwingungsmessungen mit Beschleunigungssensoren. Jedoch gibt es hierfür absolut keine Grundlage, da Signale von Wegsensoren nicht mehr von der ‚Wirklichkeit‘ zeigen als solche von Beschleunigungssensoren. Beide zeigen nur die Symptome der Fehler; die Änderungen in den Kräften, die auf die drehenden Bauelemente alleine wirken, können eine echte Darstellung des Fehlers wiedergeben - nicht aber die resultierende Schwingung. Leider können diese Kräfte nicht direkt gemessen werden.

## Zusammenfassung

Jedes gute Werkzeug hat seine spezielle Verwendung und seinen besonderen Platz unter den anderen Werkzeugen in Ihrem „Werkzeugkasten“. Mit der Hüllkurvenanalyse ist es nicht anders. Basierend auf der Auswertung von Amplitudenmodulationen in Rauschsignalen und Strukturresonanzen, gibt es keinen Zweifel, dass die Hüllkurvenanalyse eine effiziente Möglichkeit zur Ermittlung, Diagnose und Beurteilung des Wälzlagerzustandes ist.

Die Hüllkurvenanalyse hat ein viel größeres Feld der Anwendung, wenn man bedenkt, dass ihr Hauptnutzen darin liegt, den hochfrequenten Modulationseffekt in den niederen Frequenzbereich zu „verschieben“. Es beseitigt daher die Notwendigkeit für eine extrem hohe Auflösung, die häufig inkompatibel ist mit der fehlenden Drehzahlstabilität, wie man sie bei rotierenden Maschinen antrifft. Amplituden-Demodulation der reinen Tonanteile ist eine

## Über den Autor

Ein Doktor der angewandten Mechanik, Joelle Courrech, hat über 20 Jahre im Bereich der Schwingungsanalyse und Maschinenzustandsüberwachung gearbeitet. Sie hat zahlreiche Artikel und

Anzeige der Fehleridentifikation. Einige Beispiele hierfür sind Modulation der Schlitzharmonischen in elektrischen Maschinen durch die Schlupf-Frequenz, die Zahneingriffs-Frequenz durch eines der Zahnräder oder Modulation der Schaufelpassierfrequenz durch die Drehzahl.

Zusätzlich bietet der Gebrauch der Hilbert-Transformation an einem rund um die Trägerfrequenz gezoomten Zeitsignal, anstatt zu filtern und zu korrigieren, wie es üblicherweise für die Wälzlager-Fehlerdiagnose durchgeführt wird, nicht nur Amplitudendemodulation sondern auch Phasen- und Frequenz-Demodulation. Die Frequenz-Demodulation erschließt den Bereich neuer Getriebefehler-Diagnostiken und der nicht so bekannten Torsionsprobleme.

Aber warum sollte man einen kompletten Werkzeugkasten mit sich herumtragen, wenn man nur ein Werkzeug benutzen wird? Es wird immer empfohlen, die Hüllkurvenanalyse als Teil einer gesamten Instandhaltungsstrategie zusammen mit anderen Signalverarbeitungstechniken einzusetzen, besonders wenn eine Entscheidung für die Abschaltung kritischer Maschinen beteiligt ist. Das FFT-Spektrum sollte in Betracht gezogen werden, da es alle ursprünglichen Signale zeigt, während die Kepstrumanalyse – eine reine lineare Transformation – genutzt werden kann, um die Effekte durch den Übertragungsweg von solchen durch Erregerkräfte zu trennen. Es ist sogar möglich, die Größe von Hohlräumen oder Ausplatzungen zu bestimmen, welches mehr mit der Schwere der Störung als mit der Umfang der Modulation zusammenhängt.

Kann man schließlich folgern, was die richtige Methode der Hüllkurvenanalyse ist? Letztendlich, da kein Bericht, kein Protokoll oder keine Theorie lange Jahre erfolgreicher Überwachungserfahrung mit der Hüllkurvenanalyse ersetzen kann – versuchen Sie es und werten Sie die Ergebnisse für sich selbst aus!

Konferenzpapiere insbesondere bezüglich Diagnosen von Wälzlager, Getriebe und Hubkolbenverdichter geschrieben und hat ihren Teil zu den Hauptnachschriftbüchern wie dem "Shock and Vibration Manual" und dem "Handbuch der akustischen Messung u. der Lärmkontrolle" beigetragen.