

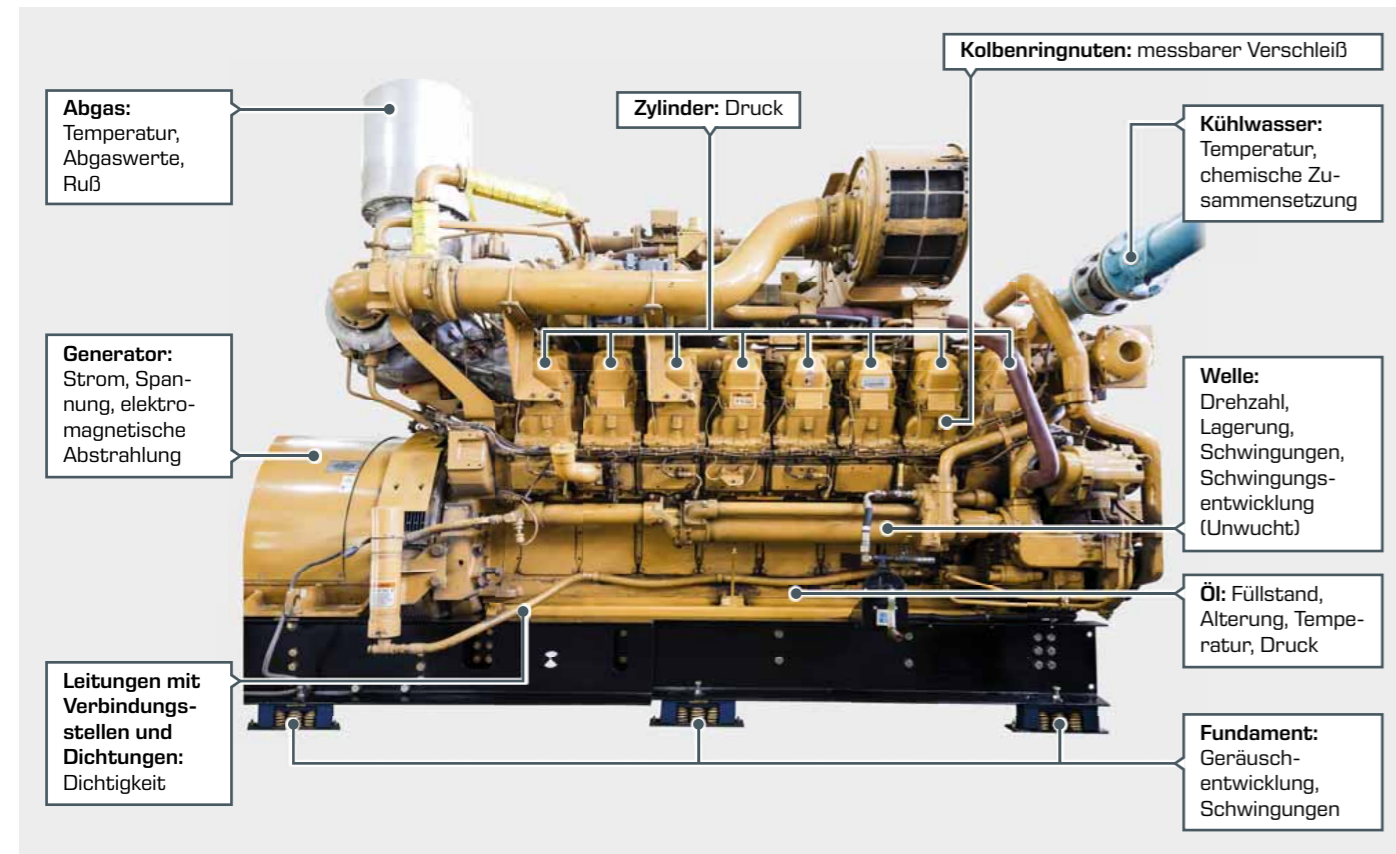
Maschinendiagnose

Ziel der Maschinendiagnose, die auch Maschinenzustandsüberwachung oder im Englischen CMS Condition Monitoring System genannt wird, ist es, eine bedarfsorientierte Wartung oder Instandsetzung durchzuführen und damit Reparatur- und Stillstandzeiten einer Maschine zu minimieren. Schäden sol-

len bereits im Stadium der Entstehung erkannt werden. Dies erhöht die Gesamtanlageneffektivität (OEE Overall Equipment Effectiveness), ein Maß für die Wertschöpfung einer Anlage und optimiert die Kostenstruktur.

Was charakterisiert den Zustand einer Maschine?

Einige messbare Zustandsgrößen am Beispiel eines Dieselgenerators:



Maschinendiagnose dient zur

- Schwachstellenanalyse, um einen Ablauf zu optimieren bzw. zu erwartende Fehlentwicklungen frühzeitig zu erkennen
- zustandsorientierten Instandhaltung, Beispiel hierfür ist der Ersatz von Autoreifen beim Unterschreiten der vorgeschriebenen Mindestprofiltiefe
- Vermeidung bzw. Minimierung von Ausfällen durch vorausbestimmte Instandhaltung, z.B. Ölwechsel in festen Intervallen oder nach einer bestimmten Kilometerleistung bei Kraftfahrzeugen

Maschinendiagnose führt zur

- Erhöhung und optimalen Nutzung der Lebensdauer von Anlagen und Maschinen
- Verbesserung der Betriebssicherheit
- Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit
- Optimierung von Betriebsabläufen
- Reduzierung von Störungen
- Einsparung von Kosten

Maschinendiagnose wird durchgeführt bei

Stillstand der Maschine durch:

- Demontage und Sichtprüfung
- Verschleißmessung
- Rissprüfungen (Röntgen, Ultraschall, magnetische Durchflutung, Eigenfrequenzmessung)

laufender Maschine durch:

- Messung der Zustandsgrößen, z.B. Schwingungsmessung
- Schallmessung
- Verlagerung der Welle
- Schmierstoffanalyse

Die Bedeutung von Schwingungen in der Maschinendiagnose

Der mechanische Zustand einer Maschine oder von Maschinenteilen lässt sich gut über die Art und Größe der von ihr erzeugten Schwingungen beurteilen. Hierzu werden die Schwingungen mit Sensoren und Messgeräten aufgenommen und ausgewer-

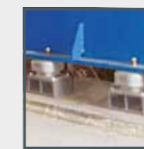
tet. Die korrekte Interpretation der Messsignale erfordert ein gutes Verständnis der Wirkmechanismen und ein gewisses Maß an Erfahrung.

Ursachen für Schwingungen

1. Umlaufende oder periodische Kräfte durch

- Pressen oder Stanzen
- Zwängungen, Ausrichtfehler

Beispiele aus der Praxis für Abhilfe



Elastische, schwingungsdämpfende Lagerung der Maschine, um die Fortleitung der Schwingung zu verhindern/minimieren.

2. Trägheitskräfte durch rotierende und oszillierende Massen

- hin- und hergehende Kolben
- rotierende Unwuchten



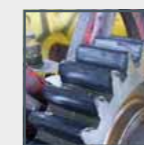
Reifen werden ausgewuchtet, um Unwuchten zu beheben.

3. Stöße

- Spiel in den Berührungsstellen und dabei wechselnde Anlageflächen bei formschlüssiger Kraftübertragung
- Kontaktverlust bei kraftschlüssiger Kraftübertragung
- Überrollen von Fehlstellen in der Oberfläche



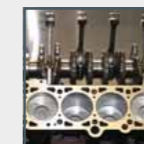
Vorgespannte Lager erlauben eine exaktere Wellenführung, erhöhen die Steifigkeit und minimieren das Lagerspiel.



Eine gute Schmierung muss gegeben sein, um Beschädigungen der Zahnräder, z.B. in Getrieben, zu minimieren und die Entstehung von Fehlstellen in der Oberfläche zu vermeiden.

4. Gaskräfte

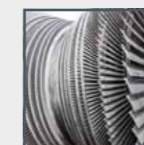
- Dehnung in der Konstruktion durch dynamische Gaskräfte und Anregung von Längs- und Biegeschwingungen
- ungleichförmige Drehung und Anregung von Drehschwingungen



Im Kurbelgehäuse treten Kräfte aus der Übertragung der Gaskräfte vom Zylinderkopf zu den Kurbelwellenlagern auf. Versteifte Kurbelgehäuse und Dehnungsschrauben vermeiden Schwingungen und Ermüdung des Werkstoffs.

5. Strömungskräfte

- Turbulenzen mit Druckschwankungen in Form von Schallwellen (Heulen, Rauschen, Pfeifen) regen Flächen an: das Gegenteil ist die Schallabstrahlung
- periodische Strömungskräfte bei Laufschaufeln



Bei der Auslegung der Laufräder von z.B. Gebläsen und Verdichtern muss durch die Anzahl und Form der Laufschaufeln auf die mögliche Entstehung von Schwingungen geachtet werden.

6. Elektromagnetische Kräfte

- dynamische Magnetfelder oder zyklische Änderungen der Geometrie (Polflächen)
- Ähnlichkeit zu Anregung über Druckschwankungen (Trafobrummen, Statorschwingungen bei Motoren)



Asynchronmotor: Bei asymmetrischem Luftspalt regen die umlaufenden magnetischen Kräfte Dreh- und Biegeschwingungen an. Durch das Variieren des Luftspalts zwischen Stator und Rotor können die erzeugten mechanischen Schwingungen verändert werden.

Maschinendiagnose

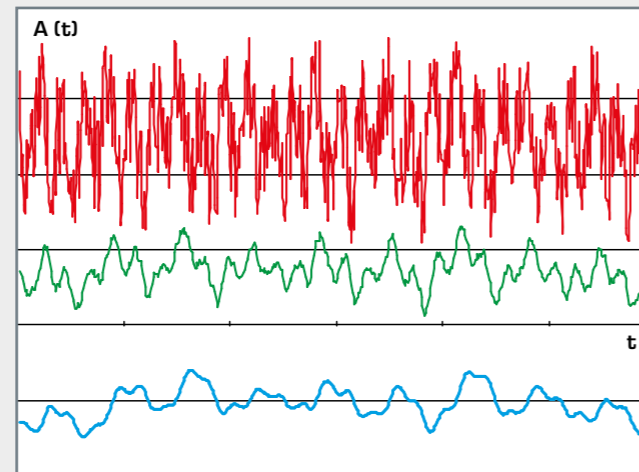
Verfahren zur Maschinendiagnose

Für die Maschinendiagnose sind die **inneren Kräfte und Energien** der Maschine von eigentlichem Interesse. Diese Größen können nicht direkt gemessen werden, wohl aber ihre Auswirkungen, die **Schwingungen**. Durch die Schwingungsmessung und -analyse kann ein Bild dieser Kräfte gewonnen werden. Man kann die Struktur der Kräfte, die Ursachen ihrer Entstehung und ihr zeitliches Verhalten aus den Schwingungsmessungen ablesen. Bei den Messsignalen handelt es sich meistens um Frequenzspektren, die durch Überlagerung verschiedener

Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen entstehen. Einige dieser Schwingungen gehören zum ordnungsgemäßen Normalbetrieb der Maschine, andere werden durch Defekte verstärkt oder erst erzeugt. Durch Interpretation der Messsignale kann der Zustand der Maschine beurteilt und ein Defekt der Maschine identifiziert werden.

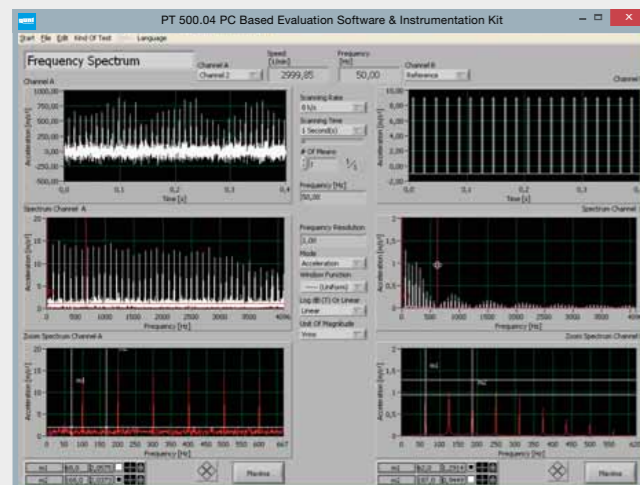
Bei der Maschinendiagnose unterscheidet man zwischen der **Kennwertüberwachung** und der **Frequenzanalyse**.

Bei der **Kennwertüberwachung** wird die Amplitude des gemessenen Schwingungssignals mit einem Grenzwert verglichen. Die Kennwertüberwachung kann kontinuierlich und automatisch erfolgen. Sie ist leicht zu implementieren und ihre Anwendung erfordert nur geringes Fachwissen. Ein verbreitet angewandter Kennwert ist der Effektivwert der Geschwindigkeit der Schwingung im Frequenzbereich zwischen 10 und 1000 Hertz. Er findet Verwendung in der für die Antriebstechnik relevanten DIN ISO 10816-3. Bei einfachen Standardaggregaten ist die Kennwertüberwachung ausreichend zur Diagnose. Bei komplexeren Anlagen ist die Zuverlässigkeit dieses Verfahrens jedoch mitunter nicht ausreichend.



Typische Schwingungssignale im Zeitbereich

- Beschleunigung
- Geschwindigkeit
- Weg



Der Einsatz der **Analyse im Frequenzbereich** ist deutlich komplexer, aber auch leistungsfähiger. Diese Analyse ermöglicht es, die Art eines Schadens zu identifizieren. Damit können die Reparaturmaßnahmen zielgerichtet eingeleitet werden. Die Frequenzanalyse erfordert in der Durchführung ein gutes Verständnis der Wirkmechanismen und zur Interpretation der Ergebnisse ausreichend Erfahrung. Meistens wird die Frequenzanalyse als ergänzendes Verfahren in Verbindung mit der Kennwertüberwachung eingesetzt.

Lerninhalte

Mechanische Schwingungen	Ursachen, Entstehungsmechanismen, Unwucht, Lavalläufer, Resonanz, Dämpfung, Stoß
Schwingungsmesstechnik	Messaufnehmer, Messverstärker, Darstellung, Oszilloskop, Drehzahlmessung
Schwingungsanalyse	Beschleunigung, Schwinggeschwindigkeit, Schwingweg, Kennwerte, Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich, Spektrum, FFT (Fast Fourier Transformation), Ordnungen, Nachlaufanalyse, Hüllkurvenanalyse, Orbit, Bahnkurve
Maschinendiagnose	Lager- und Wellenschwingungen, zulässige Schwingstärke, Wälzlagerschäden, elektromagnetische Schwingungen, Unwuchtschwingungen und Auswuchten, Getriebschäden, Schwingungen an Riementrieben, Kavitation in Pumpen, Schaufelschwingungen, Schwingungen und Stöße in Kurbeltrieben, drehzahlabhängige Schwingungen

Weiterhin werden praktische Fähigkeiten und Erfahrungen im Umgang und in der Montage von Maschinenelementen wie Lager, Wellen und Kupplungen vermittelt. Außerdem kann der Aufbau von mechanischen Maschinen studiert werden.

Fragestellungen geben wertvolle Erfahrungen für die spätere industrielle Praxis:

- Welchen Messaufnehmer verwende ich?
- Wo kann ich ein brauchbares Messsignal erwarten?
- Wie blende ich Störsignale effektiv aus?

Schäden an Antriebselementen am Beispiel von Lagern



Anzeichen für Schäden an Antriebselementen können sein:

- Ablagerungen an den Laufflächen, z. B. Passungsrost in der Bohrung eines Innenrings
- Korrosion aufgrund von Feuchtigkeit und Stillstand des Lagers
- Oberflächenzerrüttung in Form von Pittings
- Lagerschäden verursacht durch Schlupf
- Risse oder Ausbrüche

Werden die ersten Anzeichen für Maschinenschäden ignoriert, vergrößert sich der Schaden und kann zum Bruch führen.

Maschinendiagnose

Typische Versuchsergebnisse in der Maschinendiagnose

1. Identifikation von Lagerschäden

Hüllkurvenanalyse

Die Hüllkurvenanalyse wird verwendet, um zum Beispiel Schäden bei Wälzlagern und Getrieben zu identifizieren. Die Schäden erzeugen Stöße mit sehr hochfrequenten Schwingungsanteilen. Die für die Schadensdiagnose relevante niederfrequente

Stoßfrequenz kann im normalen Spektrum nur schwer oder gar nicht identifiziert werden. Die Hüllkurvenanalyse demoduliert das hochfrequente Stoßsignal und ermöglicht somit die Messung der Stoßfrequenz.

Ablauf der Hüllkurvenanalyse

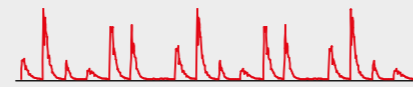
Messung des hochfrequenten Stoßsignals und Hochpassfilterung, um niederfrequente Störsignale (Unwucht, Ausrichtfehler) zu unterdrücken



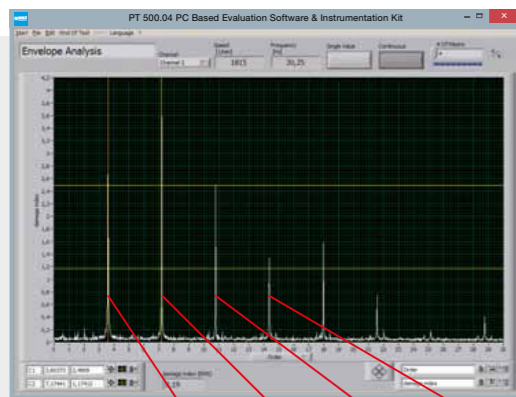
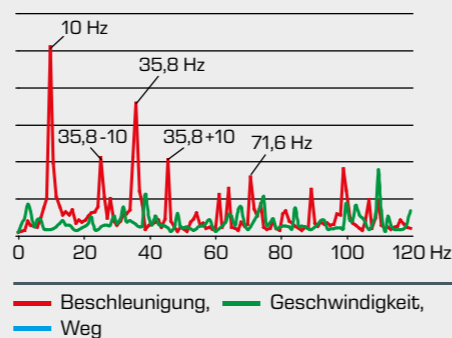
Gleichrichtung des hochfrequenten Signals



Hüllkurve des gleichgerichteten Signals durch Tiefpassfilterung erzeugen



FFT durchführen, um Spektrum der Hüllkurve zu erhalten. Deutlich ist die Drehzahl (10 Hz) und die Stoßfrequenz (35,8 Hz) zu erkennen. Die Seitenbänder im Abstand der Drehzahl (35,8 -10, 35,8 +10) zeigen eine Amplitudenmodulation an. Es handelt sich um einen Außenringsschaden mit umlaufender Last.



Ordnungen: 3,58 7,16 10,74 14,32

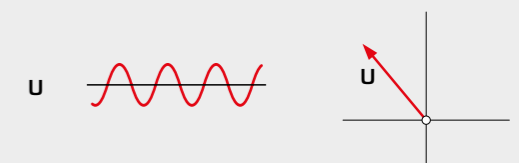
Die Abbildung zeigt das Hüllkurvenspektrum eines typischen Lagerschadens. Um eine von der Drehfrequenz unabhängige Anzeige zu erhalten, wurde als Abzisse die Ordnung gewählt. Ein drehfrequentes Signal hat die Ordnung 1. Es werden Frequenzlinien beim Vielfachen der Ordnung 3,58 abgelesen. Dies deutet auf einen Außenringsschaden des Lagers hin. Die fehlenden Seitenbandlinien mit dem Abstand einer Ordnung deuten auf eine konstante Kraftrichtung, hier also die Riemenspannung, und keine umlaufende Unwuchtbelastung.

2. Betriebsauswuchten

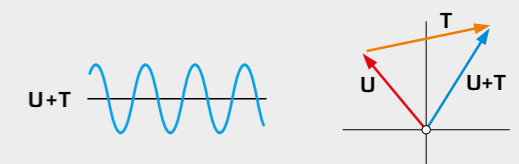
Beim Auswuchten versucht man, den Schwerpunkt des Rotors wieder mit der Drehachse in Übereinstimmung zu bringen. Dazu werden am Rotor Massen zugefügt oder entfernt. Um die Lage und Größe der nötigen Auswuchtmassen zu bestimmen, muss

zunächst die unbekannte Unwucht ermittelt werden. Da sich die Unwucht nicht direkt messen lässt, muss sie indirekt aus den messbaren Lagerschwingungen bestimmt werden.

Messung der Lagerschwingungen der unausgewuchteten Maschine (Urunwuchtlauf **U**)



Messung der Lagerschwingungen, nachdem die Maschine mit einer zusätzlichen, bekannten Unwucht versehen wurde (Testunwucht **T**). Aus dem Vergleich der beiden Messungen lässt sich die ursprüngliche Unwucht berechnen.



Berechnung der Größe und Lage der hinzuzufügenden oder zu entfernenden Auswuchtmassen (**C**). Kontrollmessung (**A**) nach durchgeführter Massenkorrektur. Je nach Erfolg der Wuchtung wird diese Prozedur so lange wiederholt, bis die gewünschten Grenzwerte der Lagerschwingung eingehalten werden.

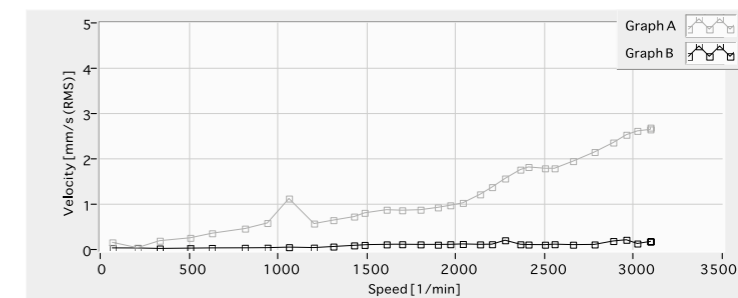


3. Identifikation von Rissen in Wellen

Wellen, die Risse aufweisen, erzeugen ein charakteristisches Schwingungssignal, das zur Identifikation des Risses genutzt werden kann. Eine Analysemethode ist die **Nachlaufanalyse**,

bei der das Schwingungssignal über einen größeren Drehzahlbereich aufgenommen und in einem speziellen Filter nach den verschiedenen drehfrequenten Ordnungen untersucht wird.

Graph A zeigt den Anteil der Lagerschwingung 1. Ordnung (1Ω), Graph B den Anteil der 2. Ordnung (2Ω).



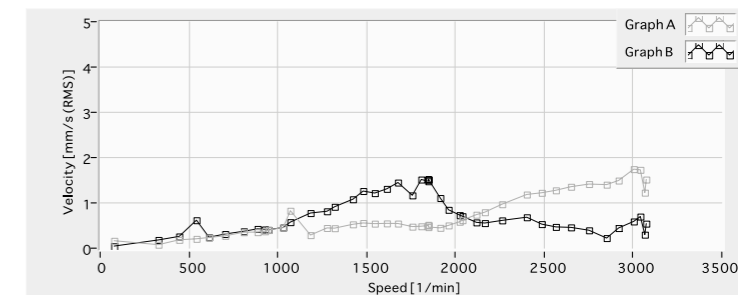
Nachlaufanalyse Welle ohne Riss

Zustand ohne Riss:

Die Lagerschwingungen der 1. Ordnung nehmen aufgrund der Unwucht ganz normal mit der Drehzahl zu. Die Lagerschwingungen 2. Ordnung sind sehr klein.

Zustand mit tiefem Riss:

Während die Lagerschwingungen 1. Ordnung ein ähnliches Verhalten wie bei einer Welle ohne Riss zeigen, gibt es bei der 2. Ordnung im mittleren Drehzahlbereich einen sehr kräftigen Anstieg, ein deutliches Indiz für einen Riss.



Nachlaufanalyse Welle mit Riss