

Einfache Grundlagen der Schwingungsdiagnostik Leitfaden für Einsteiger



Radek Sglunda
Adéla Štefková
Radim Langer



Abkürzungsverzeichnis

- AVG – Durchschnittswert
- RMS – Effektivwert
- RPM – Umdrehungen pro Minute
- * Symbol für Multiplikation
- μm – Mikrometer
- disp. = Schwingweg
- vel. = Schwinggeschwindigkeit
- acc. = Schwingbeschleunigung

Inhalt

Es gibt nichts zu befürchten	3
Ein kurzer Rückblick auf die Geschichte des Instandhaltungsmanagements.....	3
Messung.....	4
Auswertung der Messwerte	4
Die Verwendung von Normen.....	4
Was ist, wenn es keine Normen gibt?	5
Wie sieht es mit der Erfolgsquote der Diagnose aus?.....	5
Zeitsignal	6
Schwingungsamplitude.....	7
Signaldigitalisierung.....	7
Abtastfrequenz.....	8
AVG – Durchschnittswert	8
Wir können uns den Durchschnittswert auch anders darstellen	9
Einfluss der Signalform auf den Mittelwert	10
Effektivwert (RMS)	11
Ein bisschen Mathematik	12
Unabhängigkeit von der Signallänge.....	12
Was ist Frequenz?.....	13
Frequenz der Maschinendrehzahl.....	14
Schwingungssensor.....	14
Analogie zur Wechselspannung im Stromnetz	15
Schwingungsfrequenzen und was damit zu tun ist?.....	15
SI-Einheiten	17
Schwingwegmessung	17
Schwinggeschwindigkeitsmessung	18
Messung der Schwingbeschleunigung.....	19
Die Maschine ist ebenfalls ein Feder / Masse System.....	22
Periode und Phase.....	22
Erkennung und Analyse.....	24
Kennwert (Breitband)	24
Sensortypen	24

Montage des Sensors an der Maschine	25
Wo soll die Schwingung an der Maschine gemessen werden?	26
Drehzahlmessung.....	26
Welche Werte sollten zu Beginn gemessen werden?	27
Was sind die grundlegenden Maschinenfehler?	27
Wie werden die Messwerte ausgewertet?.....	28
Leistungsstarke Diagnose auch mit einem einfachen Schwingungsmessgerät....	29
Was ist Resonanz?	30
Elektrische Unwucht.....	32
Messungen in der Praxis.	34
Messberichte	35
Organisation und Auswertung der Messungen.....	35
Kalibrierung	36
Zeitsignal und Spektrum	37
Erweiterte Diagnose von Wälzlagern mittels Demodulation (Hüllkurvenanalyse).....	40
Die Schwingungen abhören.....	44
Ultraschall	44
Neuberechnungen der Werte für Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg.....	44
Warum messen wir bei dem Schwingweg niedrige Frequenzen und hohe Frequenzen bei der Schwingbeschleunigung?	45
Online-Messungen.....	46
Auswuchten	47
Einstellung der grundlegenden Messparameter	48
Sensoreinstellungen.....	48
Allgemeine Messeinstellungen.....	48
Einstellungen für die Zeitsignalmessung	49
Einstellungen für die Spektrumsmessung	49
Einstellungen für die Hüllkurvenmessung (Demodulationsmessung)	50
Was lässt sich abschließend sagen?	51

Es gibt nichts zu befürchten

Wenn Sie vor der Aufgabe stehen, in Ihrem Unternehmen eine Schwingungsdiagnostik einzuführen und durchzuführen, dann geraten Sie nicht in Panik. Dieser Bereich bietet sowohl einfache als auch komplexe Verfahren und Methoden. Sie beginnen mit den einfachsten und arbeiten sich nach und nach zu den komplexeren vor. Zu Beginn führen Sie Messungen durch, die denen mit einem Multimeter sehr ähnlich sind. Nur messen Sie keine Spannung, keinen Strom oder Widerstand, sondern Schwingungswerte.

Die grundlegende Aufgabe der Diagnose besteht darin, unerwartete Ausfälle zu verhindern, da die Beseitigung ihrer Folgen mit hohen Kosten verbunden ist. Wenn ein Wälzlager unerwartet ausfällt, werden auch andere Maschinenkomponenten in seiner Umgebung beschädigt. Deshalb ist die Reparatur sehr teuer.

Die Diagnose warnt Sie im Voraus vor der sich verschlechternden Zustand des Wälzlagers, sodass Sie einen Austausch während einer planmäßigen Stilllegung einplanen können und die Kosten deutlich geringer ausfallen. Die Aufgabe der Diagnose besteht daher darin, die Wartungskosten zu senken.

Ein kurzer Rückblick auf die Geschichte des Instandhaltungsmanagements

Früher liefen Maschinen so lange, bis sie ausfielen. Dann wurden sie repariert. Dieser Ansatz hatte zwei grundlegende Nachteile. Stellen wir uns ein relativ kleines Problem vor, zum Beispiel den Verschleiß eines Wälzlagers. Der Austausch des Lagers wäre einfach und schnell. Ist der Verschleiß jedoch groß, fällt das Lager aus und der gesamte Rotor hört auf, sich zu drehen. Das Gewicht des Rotors beträgt mehrere hundert Kilogramm. Er kommt nicht so leicht zum Stillstand. Es wirkt eine enorme Trägheit, die die gesamte Maschine in wenigen Sekunden zerstören kann. Dann ist die Reparatur langwierig und teuer.

Ein weiterer Nachteil ist der plötzliche Stillstand der Produktionslinie, wiederum aufgrund des Verschleißes eines einzigen Wälzlagers. Nehmen wir an, die Linie produziert in einer Stunde Produkte im Wert von einer Million. Wenn die Reparatur mehrere Stunden dauert, entsteht ein Verlust von mehreren Millionen.

Die weitere Entwicklung des Wartungssystems erreichte dann das Stadium der vorbeugenden Austausche. Jede Komponente, die sich mit der Zeit abnutzt, wurde in festgelegten Zeitabständen ausgetauscht. Lassen Sie uns die grundlegenden Nachteile auflisten. Die Wartungskosten sind hoch, da ständig etwas ausgetauscht wird. Zweitens wird in den meisten Fällen unnötigerweise ausgetauscht, da sich die Komponente noch in gutem Zustand befindet. Und drittens – nicht jeder Wartungseingriff ist vollkommen perfekt. Beispielsweise kann der Einbau eines neuen Wälzlagers mangelhaft durchgeführt werden, wodurch sich der Zustand des neuen Lagers schnell verschlechtert, sodass es letztendlich doch zu einem unerwarteten Ausfall kommt.

In der Folge entstand ein anderes Wartungssystem, nämlich die vorausschauende Wartung. Der Zustand und der Verschleiß der Maschine werden regelmäßig

gemessen, und wenn sich dieser verschlechtert, erfolgt ein Wartungseingriff. Das heißt, nur dann, wenn es wirklich nötig ist.

Die Schwingungsdiagnostik spielt bei der Messung des Maschinenzustands eine absolut dominierende Rolle. Sie kann den Schweregrad aller grundlegenden Maschinenausfälle genau messen. In den folgenden Kapiteln werden wir alles erläutern, was für ihre Anwendung erforderlich ist. Wir werden nicht auf theoretische Details und mathematische Formeln eingehen. Dies ist für die erfolgreiche Durchführung von Schwingungsmessungen und die anschließende Bewertung des Maschinenzustands nicht notwendig.

Früher wurde die zulässige Schwingung getestet, indem man eine Münze auf eine Maschine legte. Fiel sie herunter, galt die Schwingung als hoch.

Es gibt viele andere Möglichkeiten, den Maschinenzustand zu messen, doch diese sind sehr spezialisiert und sehr eng gefasst. Keine von ihnen erreicht die Leistungsfähigkeit der Schwingungsdiagnostik.

Messung

Was benötigen wir? Zunächst einmal ein Messgerät, nennen wir es Schwingungsanalysator, einen Schwingungssensor und ein Anschlusskabel, um den Sensor mit dem Messgerät zu verbinden. So ausgerüstet begeben wir uns zu den Maschinen zum messen; wir nennen dies eine Route. An jeder Maschine führen wir Messungen durch, die im Speicher des Messgeräts gespeichert werden. Nach der Rückkehr von der Route übertragen wir die Messdaten auf einen Computer und werten sie aus.

Zur Durchführung der Schwingungsdiagnose verwenden wir ein vom Hersteller des Schwingungsanalysators bereitgestelltes Programm. Wir erstellen eine (Route) Liste der Maschinen, und die Messdaten werden diesen zugeordnet.

Wir begeben uns in regelmäßigen Abständen auf die Route – je öfter, desto besser. Natürlich können wir nicht jeden Tag hingehen. Das optimale Intervall beträgt etwa zwei bis vier Wochen. Wenn wir Maschinen haben, deren Betrieb für das gesamte Werk unerlässlich ist, ist es besser, Online-Systeme zu verwenden, die kontinuierlich messen.

Auswertung der Messwerte

Nun liegen die Daten im Computer vor und müssen ausgewertet werden. Das bedeutet, den aktuellen Zustand der Maschinen zu ermitteln und gegebenenfalls Reparaturen oder Einstellungen zu planen. Wie gehen wir dabei vor? Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Messwerte zu betrachten.

Die Verwendung von Normen

Wenn eine Norm existiert, kann diese herangezogen werden. Die Norm gibt uns die Grenzwerte für Schwingungen vor. In der Regel sind dies die Warn- und

Gefahrengrenzwerte. Wird der Warngrenzwert überschritten, kann die Maschine zwar noch betrieben werden, wir sollten jedoch so schnell wie möglich eine Wartungsmaßnahme einleiten. Eine Überschreitung des Gefahrengrenzwerts bedeutet, dass die Maschine unmittelbar abgeschaltet und repariert werden sollte (muss). Die grundlegende Norm ist die DIN ISO 20816.

Was ist, wenn es keine Normen gibt?

Dann sind andere Vorgehensweisen erforderlich.

Wenn wir mehrere identische oder ähnliche Maschinen haben, können wir die Werte untereinander vergleichen. Wenn die Schwingungen bei fünf von sechs identischen Maschinen einen Wert von 2 aufweisen und bei der sechsten der Wert 8 beträgt, dann stimmt mit der sechsten Maschine eindeutig etwas nicht.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Trend der Entwicklung der Schwingungswerte zu analysieren. Ist der Trend über einen langen Zeitraum stabil, ist auch der Betriebszustand stabil. Das bedeutet, dass der Zustand der Lager gut ist, die Unwucht akzeptabel ist und so weiter. Steigen die Schwingungswerte an, nimmt ein Schaden zu und die Maschine muss repariert oder eingestellt werden.

Der Trend oder der Vergleich mit Werten aus der Vergangenheit ist der beste Weg, um den Maschinenzustand zu bewerten. Wenn wir selbst einen geringen Anstieg feststellen können, bedeutet dies, dass die Verschlechterung des Zustands nur gering ist und wir genügend Zeit haben, um eine Wartungsmaßnahme zu planen.

Wie sieht es mit der Erfolgsquote der Diagnose aus?

Es ist vergleichbar mit der Gesundheitsvorsorge beim Menschen. Wenn wir zu regelmäßigen Vorsorgeuntersuchungen gehen, ist das so etwas wie eine Routine. Sind die Ergebnisse der Untersuchungen ausgezeichnet, bedeutet das, dass wir vollkommen gesund sind. Und doch haben wir plötzlich ein Gesundheitsproblem, das bei den Untersuchungen nicht entdeckt wurde.

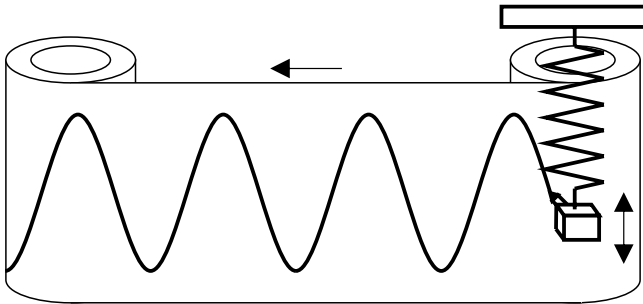
Genauso verhält es sich mit der Schwingungsdiagnostik. Sie wird niemals zu 100 % erfolgreich sein. Manchmal ist der Fehler zu tief im Inneren der Maschine verborgen und lässt sich in den Schwingungen nicht leicht erkennen. Oder er hat sich sehr schnell entwickelt, und bei der letzten Routineuntersuchung war noch alles in Ordnung.

Es kann auch vorkommen, dass uns die Messwerte noch nicht zu hoch erscheinen und wir die Maschine weiter betreiben. Plötzlich tritt ein unerwarteter Ausfall auf. Dann müssen die Warn- und Gefahrengrenzwerte gesenkt werden. So kann sogar ein unerwarteter Ausfall eine positive Bedeutung für die Zukunft haben.

Die Schwingungsdiagnostik ist für die Zustandsüberwachung von Maschinen absolut unverzichtbar. Es gibt keine andere Art der Diagnostik, die ein so breites Spektrum an Fehlern und Verschleißerscheinungen aufdecken kann.

Zeitsignal

Schwingungen sind die oszillierende, wiederholte Bewegung einer Masse zwischen zwei Endlagen. An dieser Definition ist nichts Unklares. Wichtig ist, ob die Amplitude der Schwingungen (also der Abstand zwischen den Endlagen) für den Maschinenbetrieb akzeptabel ist. Auch die Geschwindigkeit der oszillierenden Bewegung ist wichtig.

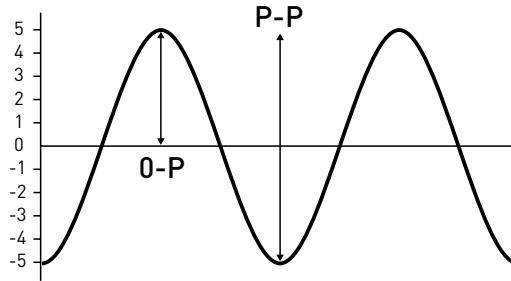


Eine Feder und eine daran hängende Masse sind ein gutes Beispiel, um Schwingungen und ihre Eigenschaften zu verstehen. Wenn wir die Feder spannen und loslassen, beginnt die Masse auf und ab zu schwingen. Die Schwingung nimmt aufgrund des Luftwiderstands und der inneren Reibung der Feder ab, bis sie vollständig zum Stillstand kommt. Stellen wir uns vor, dass diese Einflüsse nicht existieren und die Schwingung nicht abnimmt. Wir können einen Stift an der Masse befestigen und einen Papierstreifen dahinter legen. Nun spannen wir die Feder und lassen sie los, während wir gleichzeitig den Papierstreifen nach links bewegen. Der Stift zeichnet eine Kurve. Diese Kurvenform der Schwingungen ist eine Grundform und entspricht mathematisch der Sinusfunktion. Wir bezeichnen die Aufzeichnung auf dem Papier als Zeitsignal der Schwingungen und können daraus weitere nützliche Schwingungsparameter ableiten.

Schwingungsamplitude

Die Schwingungsamplitude lässt sich leicht anhand der 0-P-Amplitude messen. Wir bezeichnen sie als Spitzenwert; dabei handelt es sich um den Abstand vom Mittelwert des Signals (der der Ruheposition des Gewichts entspricht) zum Maximalwert.

In der Abbildung entspricht die 0-P-Amplitude der Zahl 5.

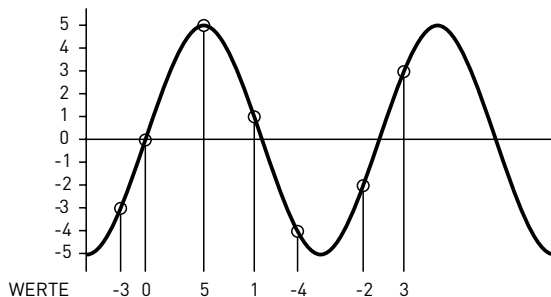


Der Vollständigkeit halber sollten wir den P-P-Wert (Peak-Peak) erwähnen, der den Abstand zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert angibt. Bei einer symmetrischen Signalform ist der P-P-Wert doppelt so groß wie der 0-P-Wert. Viele Signale sind jedoch asymmetrisch, sodass diese Beziehung nicht zutrifft.

Signaldigitalisierung

Die Aufgabe der Digitalisierung besteht darin, ein analoges Signal in Zahlen umzuwandeln. Das Bild zeigt nur ein Beispiel für einige wenige Werte, die aus dem Signal ausgelesen wurden. Wir wählen einen Zeitpunkt aus und lesen den Wert ab. Wir bezeichnen dies als Abtastwert zu einem definierten Zeitpunkt.

Dies ist nur ein Beispiel für das Ablesen.



Abtastfrequenz

Zunächst müssen wir Werte in regelmäßigen (gleichen) Zeitintervallen ablesen. Das Intervall zwischen den Messungen beträgt beispielsweise 1 ms (1 ms = 0,001 s). Beträgt die Signallänge beispielsweise 1 s, erhalten wir 1000 Abtastwerte, also eine Folge von 1000 Zahlen. Im Folgenden bezeichnen wir einzelne Messwerte in einem Zeitsignal stets als Abtastwerte. Wenn wir über genügend Abtastwerte verfügen, können wir verschiedene mathematische Formeln darauf anwenden und daraus weitere vielfältige Ergebnisse berechnen.

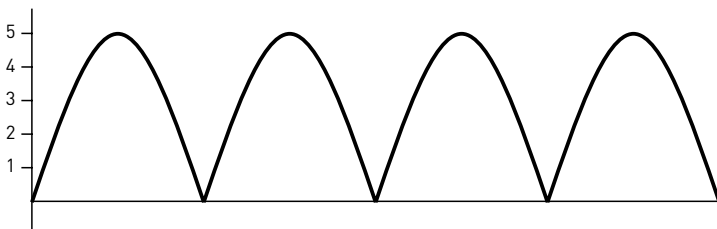
AVG – Durchschnittswert

Bisher können wir die Amplitude eines Zeitsignals als 0-P- oder P-P-Werte messen. Die Amplitude eines Zeitsignals kann auch als Mittelwert aller gemessenen Samples ermittelt werden. Der Mittelwert wird berechnet, indem die Summe der Werte aller Samples durch deren Anzahl geteilt wird. Das entspricht dem durchschnittlichen Gewicht eines Apfels in einem Korb. Wir addieren die Gewichte aller Äpfel und dividieren die Summe durch ihre Anzahl.

Nun versuchen wir, alle Werte der Abtastwerte im Zeitsignal zu addieren und durch die Anzahl zu dividieren. Das ist jedoch nicht sinnvoll. Das Sinussignal ist um den Nullpunkt symmetrisch, daher wäre der Mittelwert Null. Wir müssen anders vorgehen.

Die Lösung besteht darin, die Signalwellenform (Zeitsignal) nur in die positive Hälfte umzuwandeln. Dies erreichen wir, indem wir mit den Absolutwerten der Abtastwerte arbeiten. Dadurch werden negative Werte in positive umgewandelt, z. B. ist der Absolutwert von -3 gleich +3. Der Absolutwert von +3 bleibt +3, hier ändert sich nichts.

Die neue Form des Signals ist in der Abbildung dargestellt.



Wenn wir den durchschnittlichen AVG-Wert des Signals berechnen, erhalten wir 3,2. Bei der Sinusfunktion ist der durchschnittliche AVG-Wert immer gleich 0,64 multipliziert mit dem 0-P-Wert. In der Abbildung ist der 0-P-Wert gleich 5 und der Mittelwert beträgt $0,64 \times 5 = 3,2$.

!!! Achtung! Wir dürfen diese Umrechnung nicht auf Signale anwenden, die nicht die Form einer Sinusfunktion haben.

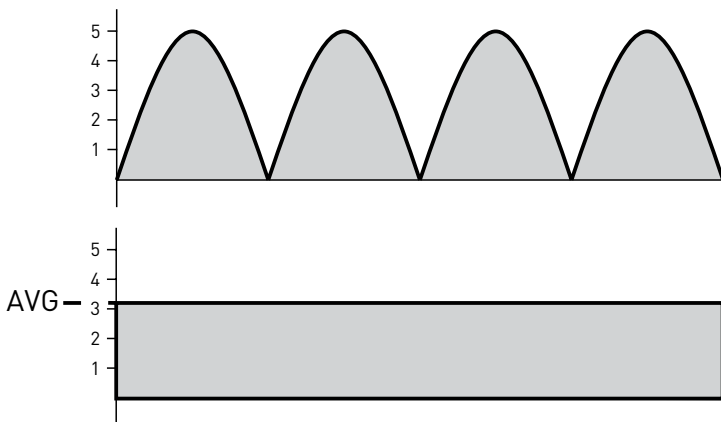
Für die neugierigen Leser stellen wir auch die mathematische Formel für eine kontinuierliche Signalwellenform vor, die wir als $f(x)$ bezeichnen.

$$\text{Denn } \text{AVG} = \frac{\int_0^T f(x) dx}{T}$$

In unserem Fall, wenn $f(x) = |\sin(x)|$, dann
$$\text{AVG} = \frac{\int_0^T |\sin(x)| dx}{T}$$

Wir können uns den Durchschnittswert auch anders darstellen

Führen wir die Sinusfunktion aus und messen wir die Fläche unter ihr. Mathematisch gesehen ist dies die Berechnung eines bestimmten Integrals. Nun zeichnen wir ein Signal, dessen Abtastwerte alle denselben Wert haben. Die Fläche unter dem Signal berechnet sich als Länge multipliziert mit diesem Abtastwert. Es ist die Fläche des Rechtecks. Unsere Aufgabe ist es, einen solchen Wert zu finden, dass die Flächen beider Signale identisch sind.



Dieser Sollwert entspricht 3,2 ($0,64 \times 5$). Diese Umrechnung gilt nicht für Signale, die nicht die Form einer Sinusfunktion haben.

Kehren wir zum Beispiel mit den Äpfeln zurück. Nehmen wir an, wir haben 20 Äpfel mit unterschiedlichem Gewicht und ihr Gesamtgewicht beträgt 4 kg. Das Durchschnittsgewicht beträgt $4 \text{ kg} / 20 = 200 \text{ g}$. Wenn wir 20 Äpfel mit einem Durchschnittsgewicht von jeweils

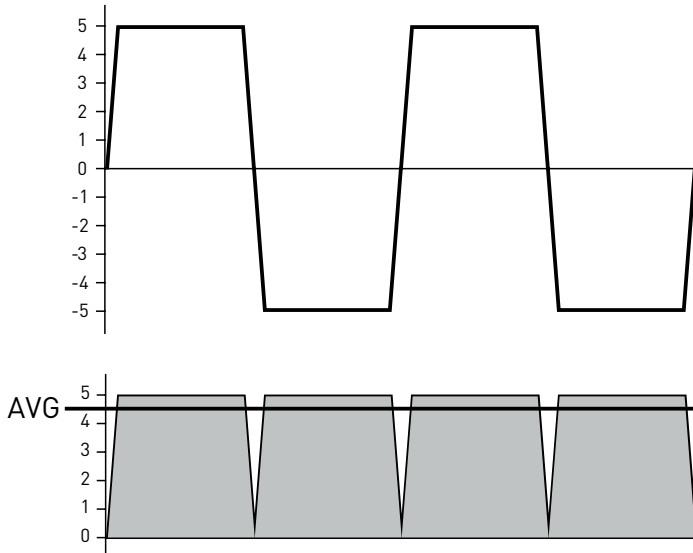
200 g nehmen, wiegen sie zusammen ebenfalls 4 kg. Dies entspricht dem Ansatz, die sinusförmige (unregelmäßige) Wellenform durch ein Signal zu ersetzen, bei dem alle Amplituden dem Durchschnittswert entsprechen. Es handelt sich also um eine Gerade.

Einfluss der Signalform auf den Mittelwert

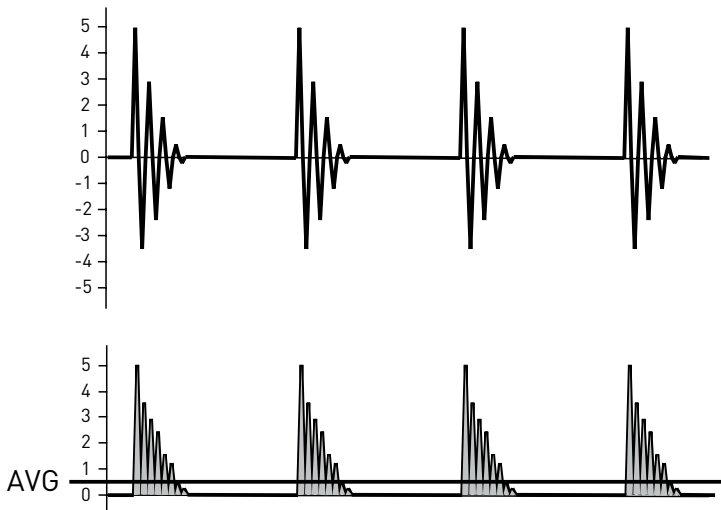
Den Fall einer sinusförmigen Wellenform haben wir bereits beschrieben.

Der Mittelwert entspricht dem Wert 0-P multipliziert mit 0,64.

Wenn wir den Mittelwert aus einer Rechteckwellenform berechnen, erhalten wir nach der Umwandlung in einen Absolutwert fast dasselbe Ergebnis wie nach der Umwandlung in ein Rechteck. Daraus folgt, dass der Mittelwert AVG fast gleich (nur geringfügig kleiner) dem Wert von 0-P ist.



Wenn das Signal nur Stöße enthält, ist die Situation umgekehrt. Der Bereich innerhalb der Impulse ist klein, und somit ist die Höhe des Rechtecks zur Ableitung des Durchschnittswerts (AVG) gering.



Wir haben gezeigt, dass es keinen festen Zusammenhang zwischen den Durchschnitts- und Spitzenwerten gibt.

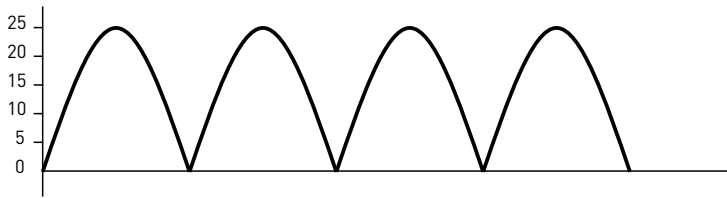
Effektivwert (RMS)

Der Mittelwert würde sich gut als Indikator für die Stärke von Schwingungen eignen, wird in der Praxis jedoch nicht verwendet. Stattdessen wird ein ähnlicher Wert verwendet, den wir als RMS (Root Mean Square) bezeichnen.

Sein Vorteil ist, dass er der im Signal enthaltenen Energie entspricht. Stellen wir uns die Stärke der Kraft, die anschließend Schwingungen verursacht, unter dem Begriff der Energie vor.

Bei einer Unwucht ist beispielsweise die Zentrifugalkraft, die uns Probleme bereitet, da sie die gesamte Maschine in Schwingungen versetzt, die Befestigungsschrauben belastet und die Lager beansprucht. Daher versuchen wir, die Größe der Kraft so weit wie möglich zu reduzieren. Und dies ist gleichbedeutend mit dem Versuch, Schwingungen zu reduzieren. Wenn wir Schwingungen reduzieren, haben wir die auf die Maschine wirkende Kraft verringert.

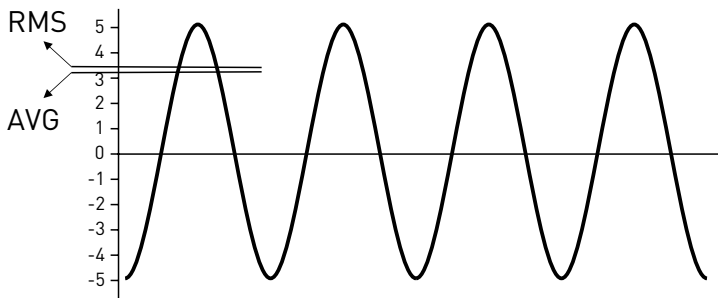
Wie wird der Effektivwert berechnet? Er ähnelt dem Mittelwert, nur werden alle Signalwerte zunächst quadriert. Dadurch werden sie gleichzeitig in positive Werte umgewandelt. Anschließend wird die Quadratwurzel des Mittelwerts berechnet.



In der Abbildung sehen wir das Signal $\sin^2$. Die maximale Amplitude hat sich auf 25 erhöht. Dies entspricht 5^2 , während der Maximalwert im ursprünglichen Signal 5 betrug.

Dann berechnen wir den Mittelwert und ziehen die Quadratwurzel daraus. Wenn die Wellenform des Signals der Sinusfunktion entspricht, ist der Effektivwert gleich dem Spitzenwert 0-P multipliziert mit 0,71. Bei einem Spitzenwert von 5 erhalten wir einen Wert von $\text{RMS}=3,55$. Dies lässt sich wiederum als konstantes Signal (Rechteck) mit einer Höhe von 3,55 und einer Breite gleich der Dauer des Signals ausdrücken.

Ich möchte noch einmal daran erinnern, dass die Umrechnungskonstante 0,71 nur auf eine sinusförmige Wellenform angewendet werden kann. Die Erklärung ist dieselbe wie bei dem Mittelwert.



Ein bisschen Mathematik

Nehmen wir ein digitalisiertes Signal y . Das heißt, wir haben eine Folge von Abtastwerten $\{y_i\}_{i=1}^N$, wir haben N Abtastwerte.

Entspricht: $\text{AVG} = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i|}{N}$ und $\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}}$

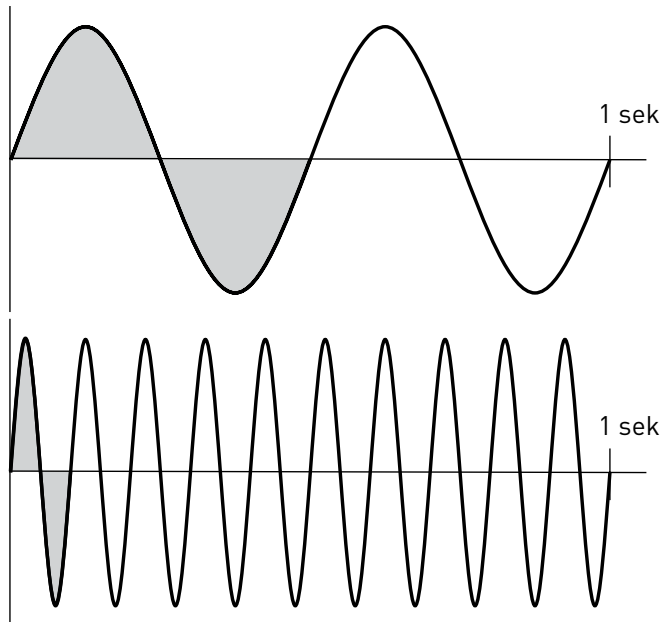
Unabhängigkeit von der Signallänge

Sowohl der AVG- als auch der RMS-Wert hängen nicht von der Dauer des Signals ab. Mit anderen Worten: Ein längeres Signal liefert keine größeren Werte. Der Grund dafür ist klar. Es handelt sich um Durchschnittswerte (wir dividieren durch die Anzahl der Abtastwerte N). Wenn das Signal mehr Abtastwerte hat, ist deren

Summe zwar größer, aber nach Division durch die Anzahl der Abtastwerte erhalten wir denselben Wert wie bei einem kürzeren Signal. Bei Maschinen mit Drehzahlen über 10 Hz (600 U/min) reicht es aus, ein Signal mit einer Länge von 1 Sekunde zu messen. Bei Maschinen mit niedrigen Drehzahlen messen wir länger. Das Signal sollte mindestens 10 Umdrehungen enthalten. Das bedeutet, dass wir bei einer Drehzahl von 2 Hz mindestens 5 Sekunden lang messen (eine Umdrehung dauert 0,5 Sekunden).

Was ist Frequenz?

Unterschiedliche Federsteifigkeiten und unterschiedliche Massen beeinflussen sowohl die Amplitude als auch die Frequenz der Schwingungen. Die Frequenz gibt an, wie viele Perioden der Auf- und Ab Bewegung die Masse in einer bestimmten Zeit, üblicherweise 1 Sekunde, ausführt.



Auf dem Bild sehen wir zwei Zeitsignale. Beide sind 1 Sekunde lang. Die obere Masse hat innerhalb von 1 Sekunde zweimal die minimale und die maximale Position erreicht. Unten war die Bewegung der Masse schneller und erreichte die minimale und die maximale Position zehnmal. Es ist klar, dass die Masse die Auf- und Ab Bewegung immer wieder wiederholt. Was ist die grundlegende (kürzeste) Bewegung, die sich periodisch wiederholt? Diese grundlegende Auf- und Ab Bewegung ist in der Abbildung dargestellt. Ihre Dauer bezeichnen wir als Periode. Da die gesamte Aufzeichnung 1 Sekunde dauert, beträgt die Periode der langsameren Schwingung oben 500 ms. Die Periode der schnelleren Schwingung unten beträgt 100 ms.

Die Frequenz wird in Hz berechnet und gibt an, wie oft sich die periodische Bewegung in einer Sekunde wiederholt. In unserem obigen Beispiel beträgt die Frequenz 2 Hz (das Zweifache der Periode) und im unteren Fall 10 Hz (das Zehnfache der Periode). Bezeichnen wir die Länge der Periode mit T, so beträgt die Frequenz:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{wenn } T \text{ in Sekunden angegeben ist}),$$

oder alternativ:

$$f = \frac{1000}{T} \quad (\text{wenn } T \text{ in Millisekunden angegeben ist}).$$

Frequenz der Maschinendrehzahl

Auch die Drehzahl (Rotation) ist eine wiederholte Bewegung, bei der die Grundperiode eine Umdrehung der Welle ist. Die Drehfrequenz kann auch in Hz ausgedrückt werden, was der Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde entspricht. Wir bezeichnen die Drehfrequenz als Maschinendrehzahl oder einfach als Drehzahl.

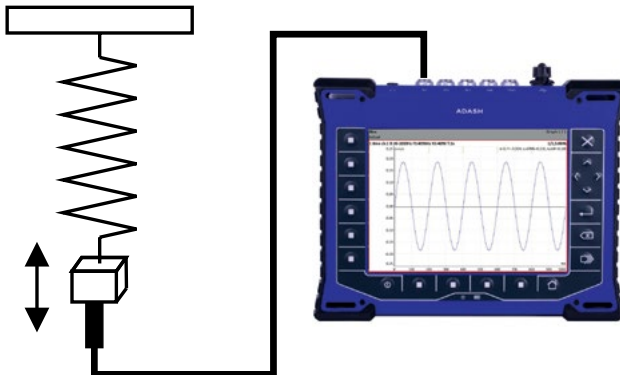
Es ist üblicher, in U/min zu messen. Dieser Wert gibt an, wie oft sich die Welle in einer Minute dreht. Die Umrechnung ist naheliegend:

$$U/\text{min} = \text{Hz} * 60 \quad \text{und} \quad \text{Hz} = \frac{U/\text{min}}{60}$$

Die Zahl ist 60, da eine Minute 60 Sekunden hat.

Schwingungssensor

Ein Schwingungssensor ist ein Gerät, das Schwingungen in ein elektrisches Signal umwandelt.



Wenn die Masse schwingt, entsteht am Ausgang des Sensors ein elektrisches Signal, das wir im Analysator darstellen. Das Messgerät zeigt dann die Schwingungswellenform an, genau dieselbe Wellenform, die wir zuvor auf Papier gezeichnet haben.

Analogie zur Wechselspannung im Stromnetz

Es ist vergleichbar mit der Messung der Spannung im Netz. Auch diese hat eine Amplitude, deren Effektivwert 230 V beträgt – in den USA sind es 110 V.

Im Stromnetz hat die Spannung eine Wellenform, die der Sinusfunktion entspricht, sodass wir bereits berechnen können, dass der 0-P-Wert im Netz $230/0,71 = 324$ V bzw. $110/0,71 = 155$ V beträgt.

Die Frequenz des Netzes beträgt 50 Hz bzw. in den USA 60 Hz, das bedeutet, dass die Dauer einer Periode 20 ms bzw. 16,7 ms beträgt.

Schwingungsfrequenzen und was damit zu tun ist?

Wir haben die Frequenz bereits erläutert. Welche Bedeutung hat die Frequenz für die Maschinendiagnostik? Sie ist von entscheidender Bedeutung. Verschiedene Fehler äußern sich in Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen. Welche? Das werden wir später erläutern.

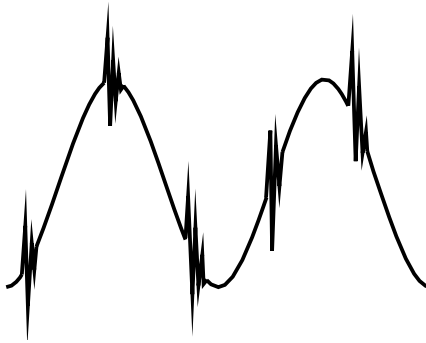
Wir wissen auch bereits, dass der Effektivwert zur grundlegenden Messung der Schwingungsamplitude verwendet wird. Dieser Wert wird bei jeder Schwingungsform gemessen, nicht nur bei der Sinusform.

Stellen wir uns vor, wir platzieren einen Schwingungssensor auf dem Lautsprecher und spielen Musik ab. Der Lautsprecher schwingt und wir hören die Musik. Wenn wir das Signal vom Sensor an einen Schwingungsanalysator anschließen, können wir den Effektivwert ganz einfach messen. Musik enthält einen breiten Frequenzbereich. Es gibt tiefe Frequenzen, mittlere Frequenzen und hohe Frequenzen. An einem Audioverstärker haben wir normalerweise drei Potentiometer, mit denen wir die Amplitude (d. h. die Stärke) der tiefen, mittleren und hohen Frequenzen einstellen. Wenn wir die tiefen Frequenzen auf Maximum und die mittleren und hohen Frequenzen auf Minimum stellen, hören wir nur tiefe Töne. Wenn wir nun den Effektivwert messen, ist dies der Wert der Schwingung bei niedrigen Frequenzen. Stellen wir nun die Bässe und Mitten auf Minimum und die Höhen auf Maximum, hören und messen wir nur die Schwingung bei den hohen Frequenzen.

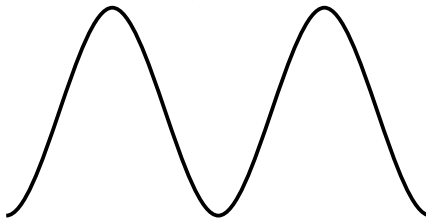
Die Schwingungsdiagnostik funktioniert nach dem gleichen Prinzip. Einige Fehler treten bei niedrigen Frequenzen auf (z. B. Unwucht), andere Fehler treten bei hohen Frequenzen auf (z. B. Wälzlagerzustand).

Wenn wir die Messparameter für den Effektivwert im Messgerät einstellen, müssen wir immer festlegen, welche Frequenzen wir messen und somit im Signal behalten wollen und welche Frequenzen wir nicht messen wollen und daher aus dem Signal entfernen.

Wir definieren immer einen Bandpassfilter mit den Frequenzen F_{min} und F_{max} . Das bedeutet, dass alle Frequenzen unterhalb von F_{min} und alle Frequenzen oberhalb von F_{max} aus dem Signal entfernt werden.



Die Abbildung zeigt ein einfaches Zeitsignal, das eine sinusförmige Komponente bei niedriger Frequenz und Schwingungsstöße bei hohen Frequenzen enthält. Wenn wir die Frequenzmessung so einstellen, dass die niedrigen Frequenzen durchgelassen und die hohen Frequenzen herausgefiltert werden (Tiefpassfilterung), dann messen wir ein Signal, das wie folgt aussieht:



Wenn wir die niedrigen Frequenzen herausfiltern und die Schwingungen durchlassen (Hochpassfilterung), dann messen wir ein Signal, das wie folgt aussieht:



Um hohe Frequenzen zu entfernen, stellen wir z. B. $F_{min}=10$ Hz und $F_{max}=500$ Hz ein. Um tiefe Frequenzen zu entfernen, stellen wir z. B. $F_{min}=5000$ Hz und $F_{max}=25000$ Hz ein.

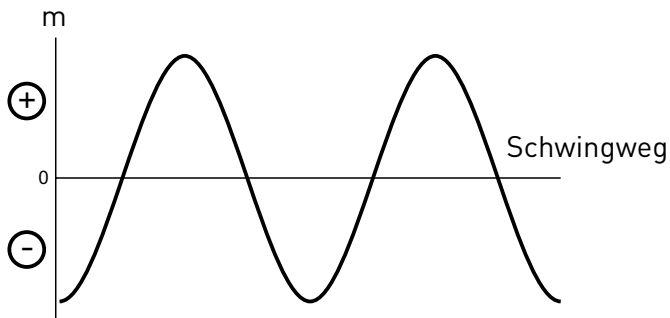
SI-Einheiten

Jede Messung muss eine physikalische Einheit haben. Beispielsweise wird Masse in Kilogramm gemessen, Zeit in Sekunden. Die in verschiedenen Teilen der Welt verwendeten physikalischen Einheiten können voneinander abweichen. Um eine gewisse Kompatibilität zu erreichen, wurde das internationale SI-Einheitensystem eingeführt, das darauf basiert, dass Messgrößen unabhängig vom Ort der Messung weltweit die gleichen Werte haben.

Zu den SI-Basiseinheiten gehören die Sekunde (s, sec, Zeiteinheit), der Meter (m, Längeneinheit), das Kilogramm (kg, Masseinheit) und andere.

Schwingwegmessung

Dieser Teil ist etwas schwieriger zu verstehen.



Kehren wir zum Beispiel der Feder und der Masse zurück, auf die wir den Stift gesetzt haben. Der Stift zeichnet dann eine Schwingungswellenform auf das sich bewegende Papier. Aber welche Einheit hat die Signalform? Wenn wir einen Vorgang messen wollen, müssen wir immer dessen physikalische Einheit definieren. Was ist die Einheit der Schwingung einer Masse an einer Feder? Es ist offensichtlich, dass der Stift die Position der Masse über die Zeit zeichnet. Oder wir können sagen, dass es sich um den Schwingweg (die Verschiebung, Auslenkung) der Masse über die Zeit handelt.

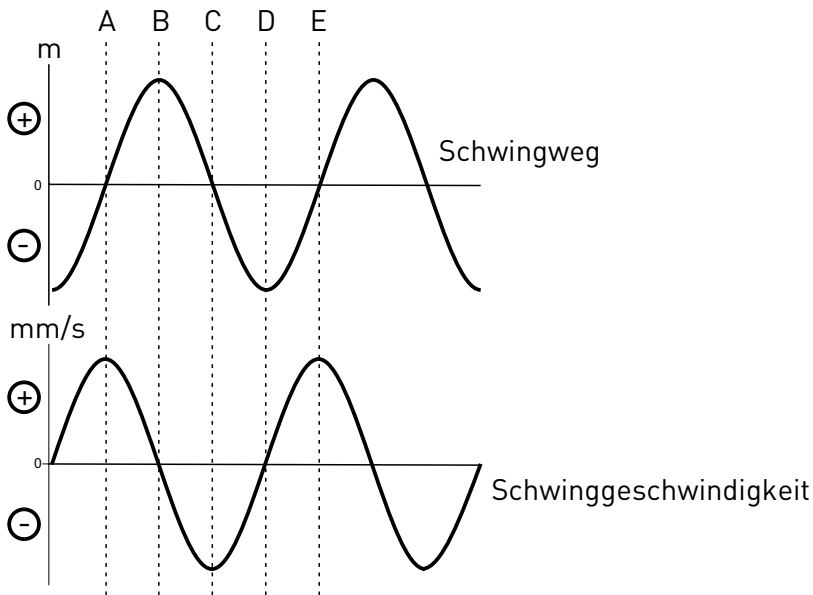
Die SI-Einheit für den Schwingweg (die Auslenkung) ist der Meter (m). Diese kann auch in cm, mm, μm , Zoll oder Milli Zoll (1 mil = 0,001 Zoll) umgerechnet werden.

Bewegt sich das Gewicht nach oben, bezeichnen wir diese Richtung als Plus (positiv). Die Richtung nach unten wird als Minus (negativ) bezeichnet. Wir gehen davon aus, dass die Werte oben positiv und die Werte unten negativ sind.

Schwinggeschwindigkeitsmessung

Wir können auch andere Größen messen. Die Masse bewegt sich wiederholt auf und ab. Wir können einen Tachometer an der Masse anbringen. Er funktioniert wie ein Tachometer in einem Auto. Nun können wir die Geschwindigkeit der Massenbewegung messen, was dann der Schwinggeschwindigkeit entspricht. Unser Drehzahlmesser hat in der Mitte den Nullpunkt. Die Nadel kann nach rechts (positive Richtung) oder nach links (negative Richtung) ausschlagen. Das hängt davon ab, ob sich die Masse nach oben (das ist die Plus Richtung) oder nach unten (das ist die Minus-Richtung) bewegt. Wäre ein solcher Drehzahlmesser in einem Auto eingebaut, würde er beide Geschwindigkeiten anzeigen – vorwärts und rückwärts.

Es ist klar, dass sich im Fall einer Feder auch die Geschwindigkeit ändert – sie ist nicht konstant. Wann ist die Schwinggeschwindigkeit am größten? Auch das ist klar: Die Masse bewegt sich am schnellsten, wenn sie die Mittelposition durchläuft. Und wann ist sie am kleinsten? Sie ist nicht nur am kleinsten, sondern gleich Null. Das ist der Fall, wenn sie die maximale oder minimale Position erreicht. Das lässt sich leicht vorstellen. An diesen Endpositionen kommt die Masse vollständig zum Stillstand, da sie die Richtung wechseln muss.



Es ist also nicht überraschend, dass, wenn die Form der Verschiebung (Schwingweg) eine Sinusfunktion ist, auch die Form der Schwinggeschwindigkeit eine Sinusfunktion ist. In der Abbildung sehen wir die Schwingweg Wellenform und darunter die Schwinggeschwindigkeit Wellenform. Wir können erkennen, dass die Wellenform der Schwinggeschwindigkeit nach links verschoben ist. Es handelt sich genau um ein

Viertel einer Periode. Wenn die Periodendauer T beträgt, beträgt die Verschiebung $T/4$ nach links, also in der Zeit zurück.

Man könnte auch sagen, dass die Signalform der Schwinggeschwindigkeit um $3/4 \cdot T$ nach rechts verschoben ist. Das ist ebenfalls richtig. Wir können die Verschiebung in beide Richtungen zählen, da sich die Bewegung periodisch wiederholt.

Was wäre die physikalische Einheit? Es handelt sich um Schwinggeschwindigkeit, daher ist die SI Einheit m/s. Bei Schwingungen würden wir jedoch sehr kleine Werte in m/s erhalten. In der Praxis verwenden wir mm/s oder Zoll/s.

Die Abbildung zeigt die Zeitpositionen A, B, C, D, E. In Position A bewegt sich das Gewicht (in positiver Richtung), passiert gerade die Mittelposition und hat die maximale positive Schwinggeschwindigkeit.

Nachdem es die Position A verlassen hat, nähert sich das Gewicht der Position B. Sein Abstand von der Mittelposition nimmt zu. Die Schwinggeschwindigkeit ist positiv, da es sich um eine Aufwärtsbewegung handelt. Die Geschwindigkeit nimmt jedoch allmählich ab, während die Bewegung in Position B zum Stillstand kommt. Nun ist die Geschwindigkeit null, die positive Verschiebung (Schwingweg) erreicht ihren Maximalwert. Nach dem Verlassen von Position B nähert sich die Masse der Position C, wo sie die Mittelposition durchläuft. Von B nach C nimmt die Geschwindigkeit in negativer Richtung zu (die Masse bewegt sich nach unten). Am Punkt C ist die negative Schwinggeschwindigkeit am höchsten.

Nach Position C nähert sich die Masse der Position D, die die maximale negative Verschiebung (nach unten) darstellt. Die negative Schwinggeschwindigkeit nimmt ab. Die Masse kehrt in D die Bewegungsrichtung um, wo die Geschwindigkeit null ist.

Nach dem Verlassen von Position D bewegt sich die Masse nach oben, sodass die Schwinggeschwindigkeit positiv ist. Die Masse erreicht die Mittelposition E und der Vorgang wiederholt sich. Die Position E entspricht A.

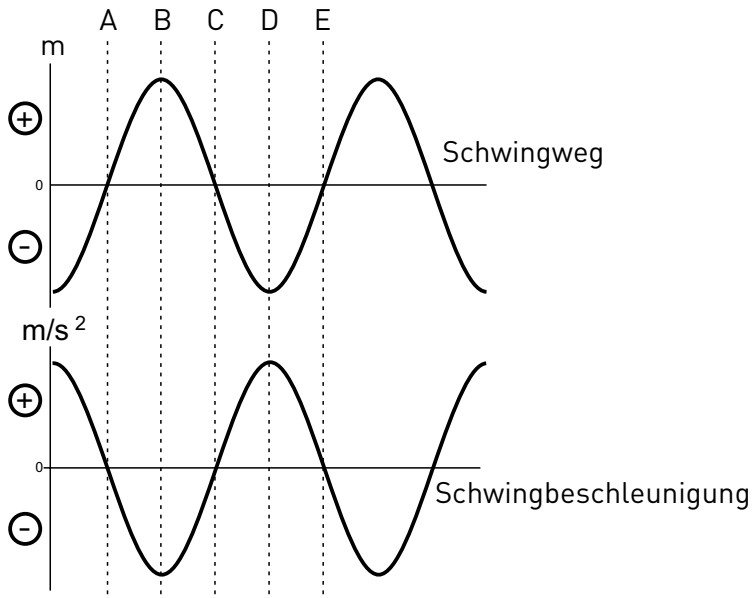
Was die Schwinggeschwindigkeitswerte betrifft, so sind sie positiv (Plus), wenn sich die Masse nach oben bewegt (wir haben diese Bewegung als Plus gekennzeichnet). Die Schwinggeschwindigkeitswerte sind negativ (Minus), wenn sich die Masse nach unten bewegt.

Messung der Schwingbeschleunigung

Die letzte verwendete Größe ist die Schwingbeschleunigung. Die physikalische Eigenschaft der Beschleunigung ist die Änderung der Geschwindigkeit. Wenn ein Stein fällt, fällt er aufgrund der Schwerkraft immer schneller. Und das ist ein sehr gutes Beispiel. Damit ein Objekt beschleunigt oder abgebremst wird, muss eine Kraft auf es einwirken. Um ein Auto zu beschleunigen, muss die Kraft des Motors wirken (das heißt, eine positive Beschleunigung in Richtung der Geschwindigkeit, d. h. in Bewegungsrichtung). Im umgekehrten Fall, zum Abbremsen, muss die Kraft der Bremsen wirken (dies ist eine negative Beschleunigung entgegen der Geschwindigkeitsrichtung, d. h. der Bewegungsrichtung).

Außerdem ist unsere Masse auf der Feder der von der Feder erzeugten Kraft ausgesetzt. Wenn wir die Feder zusammendrücken, erzeugt die Feder eine Kraft gegen die Kompression und versucht, in die Mittelstellung zurückzukehren. Wenn die Masse jedoch die Mittelstellung erreicht, hört die Bewegung nicht auf. Die Trägheit bewirkt, dass sich die Masse, sich kontinuierlich durch die Mittelposition zu bewegen. Sie beginnt, die Feder zu dehnen. Die gedehnte Feder erzeugt eine Kraft in die entgegengesetzte Richtung. Sie will die Masse zurück in die Mittelposition bringen. Dieser Vorgang wiederholt sich. Die Kraft entspricht eigentlich der Beschleunigung. Die Formel $F = m \cdot a$ beschreibt die Beziehung zwischen Masse, Kraft und Beschleunigung. Da die Masse m konstant ist, können wir erkennen, dass die Beschleunigung direkt mit der Kraft zusammenhängt.

In der nächsten Abbildung sehen wir den Schwingweg und die Schwingbeschleunigung. Wir erkennen, dass die Wellenform Schwingbeschleunigung um eine halbe Periode nach links verschoben ist. Im Vergleich zur Wellenform der Schwinggeschwindigkeit sehen wir, dass die Schwingbeschleunigung um eine Viertelperiode nach links oder zeitlich zurück verschoben ist. Es überrascht nicht, dass die Wellenform der Schwingbeschleunigung wiederum der Sinusfunktion entspricht.



Die Zusammenhänge in diesem Fall sind etwas komplizierter, aber lassen Sie uns darauf eingehen. Beschreiben wir die einzelnen Positionen A bis E und die Vorgänge dazwischen.

- A Die Masse durchläuft die mittlere Position mit maximaler Schwinggeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit nahm vor A zu und wird nach A abnehmen. Es ist die mittlere Position, die Feder ist weder zusammengedrückt

noch gedehnt. Am Punkt A wirkt keine Kraft. Die Beschleunigung ist also null. Wenn wir uns die Position A in einem Auto vorstellen wollen, dann drücken wir vor A das Gaspedal und beschleunigen. Bei A nehmen wir den Fuß vom Gaspedal und setzen ihn auf die Bremse, und nach A drücken wir die Bremse und bremsen ab.

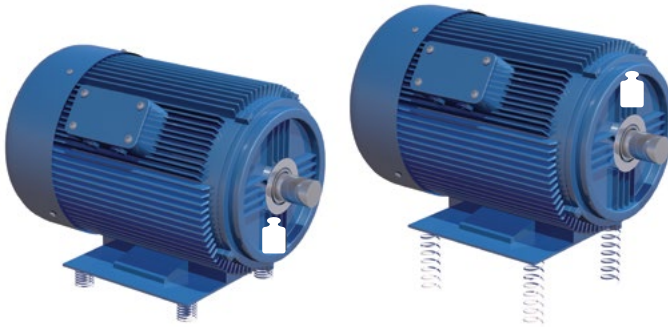
- A-B Die Trägheit bewegt die Masse nach oben und drückt die Feder zusammen. Die Feder erzeugt eine nach unten gerichtete Kraft, und diese Kraft ist umso größer, je stärker die Feder zusammengedrückt wird. Die Bewegung der Masse ist positiv (Aufwärtsbewegung), die Beschleunigung (d. h. die Kraft) ist negativ (d. h. entgegen der Bewegung). Die Bewegung der Masse wird verlangsamt.
- B Die Kraft der zusammengedrückten Feder hat die Aufwärtsbewegung gestoppt. Die Masse ändert ihre Bewegungsrichtung in eine negative (nach unten), die Schwinggeschwindigkeit ist null. Die Feder ist jedoch weiterhin zusammengedrückt und erzeugt eine negative (nach unten gerichtete) Kraft, die die Abwärtsbewegung der Masse auslöst.
- B - C Die Kraft der zusammengedrückten Feder drückt die Masse weiter nach unten und beschleunigt ihre Bewegung (negative Richtung). Diese Kraft nimmt jedoch allmählich ab. Die weniger zusammengedrückte Feder erzeugt weniger Kraft. Die Masse beschleunigt daher weniger stark, bewegt sich aber weiterhin nach unten.
- C Die Masse passiert die Mittelstellung. Dies ist der neutrale Zustand der Feder, in dem sie weder zusammengedrückt noch gedehnt ist und keine Kraft erzeugt. Die Schwingbeschleunigung ist null.
- C - D Die Trägheit hält die Masse in ihrer Abwärtsbewegung (negativ) und die Feder dehnt sich aus. Sie erzeugt eine nach oben gerichtete Kraft, die der Abwärtsbewegung entgegenwirkt. Nun findet ein Kampf zwischen Trägheit und Federwiderstand statt. Die von der Feder erzeugte Kraft verringert die Trägheit immer weiter, bis sie diese vollständig aufhebt. Sie will die Masse in die Mittelstellung zurückbringen.
- D Die Kraft der gedehnten Feder hat die Abwärtsbewegung gestoppt. Die Schwinggeschwindigkeit ist null, die Bewegungsrichtung ändert sich in positiv. Die gedehnte Feder erzeugt weiterhin eine positive Kraft nach oben, und die Masse beginnt sich ebenfalls nach oben zu bewegen.
- D - E Die Masse beschleunigt nach oben.
- E Hier ist der gesamte Bewegungszyklus abgeschlossen. Die Trägheitskraft beginnt, die Feder zusammenzuziehen. Wir haben die gleiche Situation wie in Position A erreicht.

Die Maschine ist ebenfalls ein Feder / Masse System

Bisher haben wir Beispiele für Schwingungen an einem Gewicht und einer Feder gezeigt. Hat dies einen Bezug zu den tatsächlichen Schwingungen an der Maschine?

Ja, es ist genau dasselbe. Die Maschine ist eine Masse und ist über Feder / Masse Elemente am Sockel befestigt. Wenn Gummidämpfer vorhanden sind, sehen wir echte Federn. Ist die Maschine jedoch mit Schrauben befestigt, besitzen auch diese Elastizität und können sich dehnen und zusammenziehen. Dazu ist lediglich eine große Kraft erforderlich.

Die Kraft, die die Maschine zum Schwingen bringt, ist in den meisten Fällen eine Unwucht. Am Rotor befindet sich eine Schwungmasse, die bei der Drehung eine Zentrifugalkraft erzeugt, wodurch die Maschine schwingt.

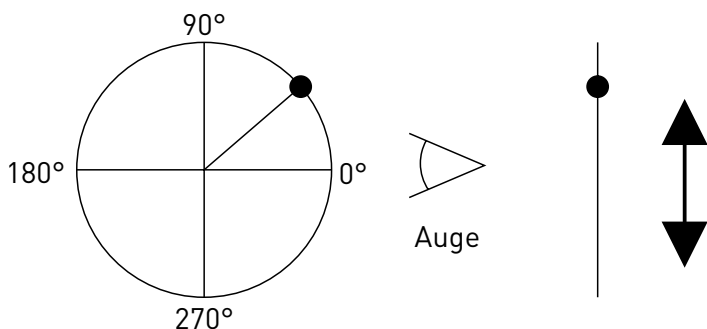


Das weiße Gewichtssymbol zeigt die Position der Schwungmasse an, wenn die Federn zusammengedrückt und gestreckt sind.

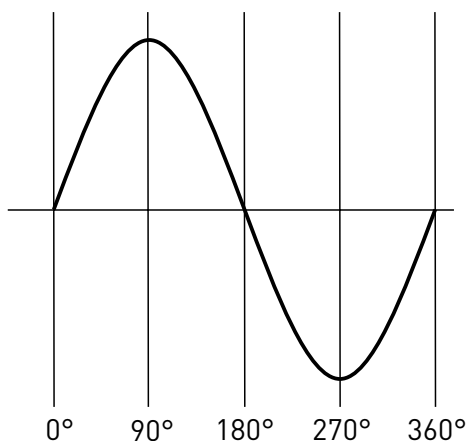
Periode und Phase

Bei der Beschreibung von Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit und Schwingbeschleunigung mussten wir die Verschiebung eines Signals im Verhältnis zum anderen ausdrücken. Eine solche Verschiebung wird als Phasenverschiebung bezeichnet.

Wir haben Begriffe wie Viertelperiode oder Halbperiode verwendet. Die Verschiebung könnte zeitlich (in Sekunden) definiert werden. Dies hat jedoch den Nachteil, dass die Periodendauer bei unterschiedlichen Frequenzen unterschiedlich ist. In der Praxis wird daher ein anderer Ansatz verwendet.



Stellen wir uns vor, wir hätten einen an einer Schnur befestigten Ball und würden ihn im Kreis schwingen. Von vorne betrachtet sehen wir, dass der Ball um den Mittelpunkt kreist. Von der Seite betrachtet sehen wir jedoch, dass der Ball zwischen zwei Extrempositionen schwingt. Es sieht genauso aus wie eine Masse an einer Feder. Wenn wir die Wellenform dieser Bewegung messen, erhalten wir wieder eine Form, die der Sinusfunktion entspricht.



Dieser Ansatz ermöglicht es uns, eine Periode als Winkelwert zu betrachten. Der Ball umrundet den Kreis einmal während einer Periode. Und der Kreis hat 360 Grad. Die Länge einer Periode kann also auch als 360 Grad betrachtet werden. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass er nicht von der Frequenz abhängt. Es spielt also keine Rolle, wie lange eine Periode in Sekunden dauert. Winkelmäßig dauert sie einfach immer 360 Grad.

Wenn wir nun sagen wollen, dass die Wellenform der Schwingungsgeschwindigkeit um eine Viertelperiode nach links (d. h. entgegen der Zeit) verschoben ist, dann sagen wir, dass sie um minus 90 Grad verschoben ist. 90 ist ein Viertel von 360 und das Minuszeichen steht für die Richtung entgegen der Zeit. Nun wissen wir also, dass die Phasenverschiebung in Grad angegeben wird.

Erkennung und Analyse

Die Schwingungsdiagnostik hat in der Praxis zwei grundlegende Aufgaben. Die erste besteht darin, festzustellen, ob sich der Zustand der Maschine verändert hat. Dies wird als Problemerkennung bezeichnet. Die zweite besteht darin, die Schwingung genauer zu analysieren und herauszufinden, welcher Fehler oder welcher Verschleiß an der Maschine aufgetreten ist.

Erkennungsmessungen müssen einfach und schnell sein, damit wir Maschinen so oft wie möglich messen können. Am häufigsten werden Kennwert Messungen verwendet. Der Begriff „Kennwert“ bedeutet, dass die Messung ein breites Frequenzband abdeckt. Der Messwert kann dann RMS (am häufigsten verwendet), 0-P, P-P und andere sein.

Kennwert (Breitband)

Wenn wir jemandem mitteilen wollen, welchen Gesamt Kennwert wir gemessen haben, müssen wir immer vier Parameter angeben. Wenn wir sagen, wir hätten 4,8 gemessen, ist das völlig wertlos. Wenn wir eine Einheit hinzufügen und es 4,8 mm/s ist, ist es schon etwas besser. Wir müssen auch angeben, welche Art von Berechnung wir verwendet haben (z. B. RMS). So erhalten wir 4,8 mm/s_{RMS}. Und die vierte Angabe ist, in welchem Frequenzband wir gemessen haben, d. h. welcher Bandpassfilter verwendet wurde (z. B. 10–1000 Hz).

Der korrekte Ausdruck lautet also 4,8 mm/s_{RMS} im 10–1000-Hz-Band.

Merken Sie sich diese Viererregel immer.

Wenn die Art der Berechnung im Text oder in den Grafiken manchmal nicht erwähnt wird, spielt es keine Rolle, ob wir RMS oder 0-P messen.

Sensortypen

Wenn wir wissen, dass wir den Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit und Schwingbeschleunigung von Schwingungen messen können, sollten wir auch sagen, womit wir in der Praxis messen. In den meisten Fällen werden Beschleunigungssensoren für Messungen verwendet. Sie sind kostengünstig und können in einem breiten Frequenzbereich messen. Der Vorteil ist, dass wir das Beschleunigungssignal recht einfach in Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg umrechnen können.

Bei sehr niedrigen und sehr hohen Frequenzen gibt es einige Komplikationen, aber darauf werden wir später eingehen.

Montage des Sensors an der Maschine

Um Maschinenschwingungen genau zu messen, muss der Sensor ordnungsgemäß an der Maschine montiert werden. Zunächst müssen wir die Wiederholbarkeit der Messung sicherstellen. Das bedeutet, dass wir immer an derselben Stelle messen müssen und der Sensor immer auf dieselbe Weise montiert sein muss. Wir sollten nicht den Sensor in der Hand halten und ihn einfach an die Oberfläche der Maschine drücken.

Die Befestigungsmethode wirkt sich vor allem auf Messungen bei hohen Frequenzen aus. In der Praxis wird die Befestigung mit einem Magneten verwendet. Der Magnet darf jedoch nicht einfach an die Oberfläche der Maschine gedrückt werden. Diese ist nicht flach, und der Sensor könnte während der Messung schwanken. Dies würde den Messwert verfälschen. Wir wären nicht in der Lage, die Messung zu wiederholen und denselben Wert zu messen. Deshalb werden Messpads an die Maschine geklebt. Sie bestehen aus Edelstahl, sind magnetisch und haben eine vollkommen ebene Oberfläche. Der Sensor mit dem Magneten haftet dann perfekt auf dem Pad. Die Wiederholbarkeit der Messung ist gewährleistet. Außerdem ist sichergestellt, dass wir immer an derselben Stelle messen.

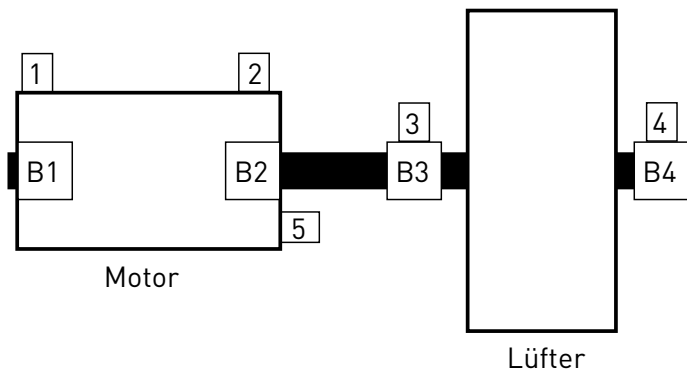


Wo soll die Schwingung an der Maschine gemessen werden?

Zunächst erklären wir, was die radiale und die axiale Messrichtung ist, d. h. in welcher Richtung wir den Sensor an der Maschine anbringen. Die radiale Richtung ist die Richtung senkrecht zur Drehachse, d. h. senkrecht zur Welle. Bei einer horizontalen Welle ist es ziemlich gleichgültig, ob er vertikal, horizontal oder diagonal montiert wird. Bei der vertikalen Welle hat dies keinen Einfluss.

Die axiale Richtung ist die Richtung parallel zur Drehachse, d. h. parallel zur Welle.

Um den Lagerzustand zu messen, müssen wir den Sensor in der Nähe des Lagers anbringen. In welcher Richtung, spielt keine Rolle. In der Regel werden radiale Richtungen verwendet.



Das Bild zeigt einen typischen Maschinenaufbau, der aus einem Motor und einem Lüfter besteht. Wir haben 4 Lager, die mit B1 bis B4 gekennzeichnet sind. Für jedes Lager messen wir radial (Sensoren 1 bis 4) und einmal an der Maschine axial (Sensor 5).

Drehzahlmessung

Die Drehzahl wird mit einem Drehzahlsensor gemessen. Wir nennen diese Tachosonde. Diese Sonde strahlt einen Laserstrahl aus, den wir auf die rotierende Welle richten. Wir bringen ein kleines reflektierendes Klebeband auf der Welle an. Nun schließen wir die Tachosonde an den Analysator an, und dieser empfängt die Reflexionen von der Welle. Der Analysator misst dann die Zeit T zwischen den Impulsen und kann die Drehzahl als $1/T$ berechnen.



Welche Werte sollten zu Beginn gemessen werden?

Wir beginnen immer mit den Gesamt Kennwerten-RMS. Man sollte das nicht unterschätzen. Damit lassen sich hervorragende Ergebnisse bei der Schwingungsdiagnostik erzielen. Aufwändigere Methoden können wir später hinzufügen. Es macht keinen Sinn, Verfahren anzuwenden, die wir nicht vollständig verstehen. Es ist jedoch auch ein weit verbreiteter Irrglaube, dass die Schwingungsdiagnostik so einfach sei wie die Messung von Temperatur oder Druck. Dass ein eintägiges Training ausreiche, um uns zu Experten zu machen.

Eine eintägige Schulung zeigt uns, wie wir einfach den Einstieg finden, damit wir sofort Ergebnisse erzielen. Danach werden wir viel Zeit darauf verwenden, uns weiterzuentwickeln und nach und nach auch komplexere Verfahren zu verstehen. Als Experte für Schwingungsdiagnostik werden Sie immer sehr leicht eine Anstellung finden, da Sie etwas wissen, was andere nicht wissen. Und jedes Werk möchte den Zustand seiner Maschinen kennen und unerwartete Ausfälle verhindern.

Wenn Sie Adash-Schwingungsanalysatoren verwenden, finden Sie beides – grundlegende Messungen mit voreingestellten Parametern und erweiterte Messungen, bei denen Sie alle Parameter nach Ihren Anforderungen einstellen können.



Was sind die grundlegenden Maschinenfehler?

Es gibt zwei grundlegende Gruppen von Maschinenfehlern. Die erste sind mechanische Ausfälle. Dazu gehören:

Unwucht – wenn der rotierende Rotor einen Schwerpunkt aufweist, erzeugt diese Masse eine Zentrifugalkraft und lässt die Maschine vibrieren. Das ist vergleichbar mit einem unausgewuchteten Rad an einem Auto.

Lockerung – die Maschine ist mit Schrauben am Sockel befestigt; wenn eine dieser Schrauben an Festigkeit verloren hat oder sogar bricht, liegt eine Lockerung vor.

Fluchtungsfehler – beispielsweise ist der Motor über eine Kupplung mit der Pumpe verbunden. Wenn ihre Achsen nicht in einer geraden Linie liegen, spricht man von einem Fluchtungsfehler.

Bei mechanischen Fehlern messen wir Werte in der Schwinggeschwindigkeit, im Effektivwert (RMS) und üblicherweise im Frequenzbereich von 10 Hz bis 1000 Hz. Liegt die Drehzahl unter 10 Hz (d. h. 600 U/min), messen wir ab z. B. 2 Hz.

Die zweite Gruppe umfasst den Verschleiß von Wälzlagern, Defekte im Getriebe usw. Hier führen wir Messungen in Beschleunigung durch, in RMS und üblicherweise im 500-Hz-Band bis zum maximalen Messbereich des Analysators. Dieser liegt in der Regel bei 25 kHz. Die Beschleunigung wird meist in g gemessen, was dem Wert der Erdbeschleunigung entspricht. $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$, wobei m/s^2 die SI-Einheit ist. Wenn g in m/s^2 umgerechnet werden muss, multiplizieren Sie den Wert einfach mit zehn.

Wie werden die Messwerte ausgewertet?

Wir haben die ersten Werte gemessen. Was tun wir nun?

Es gibt Normen für mechanische Fehler, die Grenzwerte für den guten Zustand, die Warnstufe und die Gefahrenstufe vorgeben. Wird der Warngrenzwert überschritten, kann die Maschine zwar noch betrieben werden, es müssen jedoch Reparaturen geplant werden. Wir sollten die Maschine auch häufiger messen, da sich ein bereits vorhandener Fehler rasch verschlimmern kann. Das Überschreiten des Gefahrengrenzwerts sollte bedeuten, dass die Maschine abgeschaltet und repariert oder eingestellt wird.

Die am häufigsten verwendete Norm ist ISO 20816, die verschiedene Maschinenkategorien enthält und deren Schwingungsgrenzwerte festlegt. Sie nutzt die Schwinggeschwindigkeitsmessung zur Erkennung mechanischer Fehler.

Leider gibt es keine Normen für den Zustand der Wälzlager. Üblicherweise liegen die Grenzwerte bei etwa 1 g_{RMS} für den Warngrenzwert und 2 g_{RMS} für den Gefahrenwert. Wir messen nur höhere Frequenzen, in der Regel $f_{\text{min}}=500\text{ Hz}$.

Wenn wir mehrere Maschinen desselben Typs haben, können wir die Werte dieser Maschinen miteinander vergleichen. Wenn wir beispielsweise an fünf Maschinen Werte von 1,5, 1,7, 1,4, 5,6 und $1,3\text{ mm/s}_{\text{RMS}}$ an fünf Maschinen messen, dann ist klar, dass Maschine 4 mit einem Wert von $5,6\text{ mm/s}_{\text{RMS}}$ nicht in Ordnung ist.

Wenn wir bereits mehrere Werte an einem Standort (Maschine) gemessen haben, z. B. im Abstand von einer Woche, können wir den Trend erkennen. Dabei wenden wir folgende Regeln an: Sind die Werte im Trend mehr oder weniger gleich ($\pm 15\%$), läuft die Maschine in einem stabilen Zustand und wir führen keine Reparaturen daran durch. Steigen die Werte an, liegt ein Fehler vor, den wir beheben müssen.

Wenn wir zu Beginn stabile Werte im Trend haben, nehmen wir diese als Referenz. Dann können wir die Warnschwelle auf das Doppelte der Referenz und die Gefahrenschwelle auf das Fünffache der Referenz festlegen.

Achten Sie auf die Drehzahl!

Wenn die Maschine immer mit derselben Drehzahl läuft, werden die Messwerte nicht von der Drehzahl beeinflusst. Achten Sie jedoch auf Maschinen, deren

Drehzahl sich ändert. Der Messwert ändert sich auch bei einer Drehzahländerung, selbst wenn der Maschinenzustand gleich bleibt. Im Falle von z. B. Unwucht steigt die Zentrifugalkraft mit zunehmender Drehzahl und damit auch der Schwingungswert. Das Gleiche gilt für Wälzlagerverschleiß. Wenn an den Ringen, über die die Kugeln rollen, Pitting vorliegt, steigt der Schwingungswert bei höheren Drehzahlen ebenfalls an. Daher sollte bei solchen Maschinen der Drehzahlwert immer zusammen mit dem Messwert gespeichert werden. Entweder können wir die Drehzahl mit einer Tachosonde messen, woraufhin das Analysegerät die Drehzahl zusammen mit dem Messwert speichert, oder wir können die Drehzahl vor der Messung manuell eingeben, oder wir können die Drehzahl später am Computer hinzufügen.

Leistungsstarke Diagnose auch mit einem einfachen Schwingungsmessgerät

Selbst mit einem einfachen Gerät lassen sich sehr zuverlässige Diagnosen durchführen. Ein Beispiel für ein solches Gerät ist der Adash 4900 Vibrio.



Es kann mehr als nur Gesamt Kennwerte messen, aber auf erweiterte Funktionen werden wir hier nicht eingehen. Die Grundmessung ist eine Schwinggeschwindigkeitsmessung im Bereich von 10–1000 Hz. Die Auswertungsmethode ist RMS; wenn wir also einen Wert in einen Bericht schreiben wollen, schreiben wir beispielsweise $4,8 \text{ mm/s}_{\text{RMS}}$ 10–1000 Hz. Die zweite Messung ist die Schwingbeschleunigungsmessung im Bereich von 500 bis 16.000 Hz. Die Methode ist wiederum RMS. Wir schreiben also z. B. $1,7 \text{ g}_{\text{RMS}}$ 0,5–16 kHz.

Wir beginnen mit der Schwingbeschleunigungsmessung. Die häufigste Anwendung ist die Beurteilung des Wälzlagerzustands. Niedrige Werte bis etwa $0,3 \text{ g}_{\text{RMS}}$ bedeuten immer einen ausgezeichneten Zustand. Wir sprechen hier von Standardlagertypen, die bei 600–3600 U/min betrieben werden. Bei niedrigeren Drehzahlen kann bereits ein Wert von $0,3 \text{ g}_{\text{RMS}}$ auf Verschleiß hinweisen. Bei höheren Drehzahlen hingegen kann der Wert sogar noch

höhere Werte erreichen, obwohl der Lagerzustand gut ist.

Die Verwendung von Schwinggeschwindigkeitswerten ist etwas komplizierter. Wir suchen nach den bereits beschriebenen mechanischen Fehlern wie Unwucht, Lockerung und Fluchtungsfehler.

Wenn wir entweder gemäß der Norm oder aufgrund unserer Erfahrung höhere Werte gemessen haben, können wir folgende Kriterien anwenden:

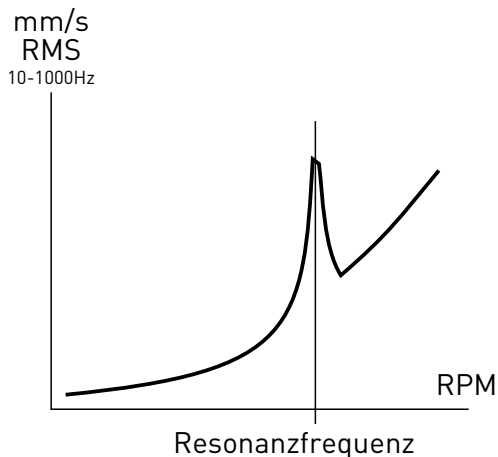
- a) Erkennung von Fluchtungsfehlern. Sind die Schwingungen in axialer Richtung höher als in radialer Richtung, ist ein Fluchtungsfehler die wahrscheinlichste Ursache. Wir sollten die Maschine ausrichten und erneut messen.

- b) Erkennung von Lockerung. Wenn a) nicht zutrifft, messen wir die Schwingungen an allen Befestigungsschrauben der Maschine. Wenn an einer Schraube ein höherer Schwingungswert vorliegt als an den anderen, liegt eine Lockerung vor. Es kann sich lediglich um eine lose Schraube handeln oder die Schraube ist bereits beschädigt. Nach der Reparatur messen wir erneut. Für diese Messung benötigen wir keine Messpads an den Schrauben. Es handelt sich lediglich um einen Vergleich der Werte. Es reicht aus, den Sensor neben den Maschinenfuß zu halten.
- c) Erkennung von Unwuchten. Wenn weder Bedingung (a) noch (b) erfüllt ist, handelt es sich höchstwahrscheinlich um eine Unwucht. Messen Sie die Werte nach dem Auswuchten erneut.

Es kann Situationen geben, in denen die Schwingung nach der Reparatur oder Einstellung weiterhin hoch ist. Dann liegen Probleme vor, die noch nicht erwähnt wurden, wie beispielsweise Resonanz oder elektrische Unwucht.

Was ist Resonanz?

Viele von Ihnen kennen das Konzept der kritischen Drehzahl. Dieses Konzept ist besonders bei leichten Großmaschinen wie beispielsweise Turbinen von Bedeutung. Das Problem tritt jedoch auch bei gewöhnlichen Maschinen auf. Stellen wir uns vor, wir erhöhen die Drehzahl der Maschine und messen gleichzeitig den Wert der Schwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich von 10 bis 1000 Hz. Es ist normal, dass der Schwingungswert mit steigender Drehzahl allmählich zunimmt. Es kann jedoch Situationen geben, in denen der Schwingungswert rapide und stark ansteigt. Beispielsweise führt eine relativ geringe Drehzahländerung von 1300 U/min auf 1400 U/min dazu, dass sich die Schwingungsamplitude verdoppelt. Das ist nicht mehr normal. Erhöhen wir die Drehzahl weiter, sinkt die Schwingung wieder. Es handelt sich um ein unerwartetes Paradoxon. Die Schwingungskurve ist in der Abbildung dargestellt.

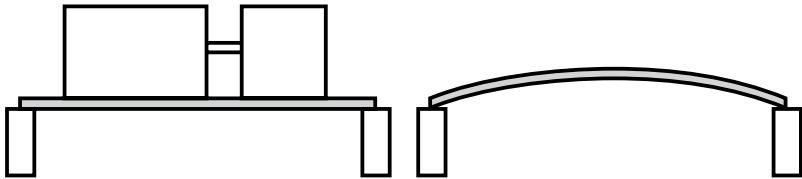


Die Drehzahl ist auf der X-Achse und der Schwingungswert auf der Y-Achse dargestellt. Die Frequenz des Spitzenwerts wird als Resonanzfrequenz bezeichnet. Dies ist eine mechanische Eigenschaft der Maschine. Bei der Resonanzdrehzahl baut die Unwucht-Zentrifugalkraft plötzlich einen viel höheren Schwingungswert auf. Diese Drehzahl wird als kritische Drehzahl bezeichnet, und die Maschine sollte unter keinen Umständen bei diesem Drehzahlwert betrieben werden. Was uns in der Praxis jedoch interessiert, ist nicht die Resonanzfrequenz der Maschine selbst. Der Maschinenhersteller achtet darauf, und die erste kritische Drehzahl muss höher sein als die verwendete Betriebsdrehzahl. Dies gilt beispielsweise nicht für Turbinen.

Die Maschine selbst ist also in Ordnung. Was kann ein Resonanzproblem verursachen?

Die Antwort ist einfach. Eine schlechte Konstruktion des Aufstellrahmens kann die Ursache sein. Wenn die Maschine direkt auf einem schweren Betonfundament montiert ist, stellt Resonanz kein Problem dar. Wenn die Maschine jedoch auf einem Stahlrahmen montiert ist, der an beiden Enden nur von Betonblöcken gestützt wird, kann es leicht zu Resonanz kommen. Der Rahmen ist möglicherweise schlecht konstruiert, da er zu flexibel ist, und das Problem tritt auf.

Jeder Rahmen hat seine eigenen Resonanzfrequenzen. Uns interessiert in der Regel die erste, also die niedrigste. Liegt die Drehzahl nahe an der ersten Resonanz, verformt sich der Rahmen wie auf dem nächsten Bild. Es ist dasselbe wie bei einer Gitarrensaite, die bei ihrer ersten Resonanzfrequenz schwingt. Man kann sogar mit bloßem Auge sehen, wie sich die Saite verformt.

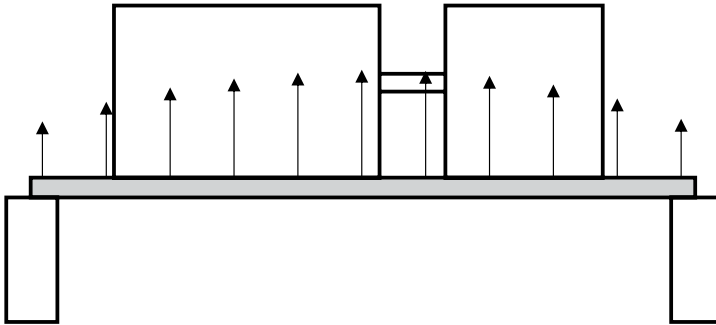


Wir können das Problem auf verschiedene Weise erkennen, wenn wir die Messung durchführen:

- a) Wenn die Drehzahl der Maschine verändert werden kann (es wird ein Frequenzumrichter verwendet), beginnen wir mit einer niedrigen Drehzahl und erhöhen diese schrittweise. Gleichzeitig messen wir die Schwinggeschwindigkeit in mm/s (RMS) im Bereich von 10–1000 Hz. Wenn die Schwingung bei einer bestimmten Drehzahl plötzlich ansteigt und dann wieder abfällt, liegt das Problem in der Resonanz des Rahmens bei dieser Frequenz = Drehzahl.
- b) Wenn die Drehzahl nicht verändert werden kann, lassen wir die Maschine mit Betriebsdrehzahl laufen. Wir starten eine kontinuierliche Messung. Die Schwingungen sind hoch. Wir schalten den Strom ab und betrachten die Schwingungswerte während des Auslaufs. Wenn es zu einem deutlichen plötzlichen Abfall kommt, besteht der Verdacht, dass die Betriebsdrehzahl nahe an der Resonanzfrequenz liegt.

- c) Wenn die Drehzahl nicht geändert werden kann, lassen wir die Maschine mit Betriebsdrehzahl laufen und führen an mehreren Stellen am Rahmen Messungen durch.

Wir tragen die Messwerte in die Grafik ein.



Wenn bei der Resonanzfrequenz eine Rahmenverformung vorliegt, sollten die Werte wie in der Abbildung oben aussehen. Niedrige Werte an den Rändern, wo sich die Stützen befinden, und höchste Werte in der Mitte.

Um dieses Problem zu beheben, müssen Sie den Rahmen austauschen oder seine Befestigung ändern. Das Hinzufügen einer weiteren Stütze in der Mitte hilft ebenfalls.

Elektrische Unwucht

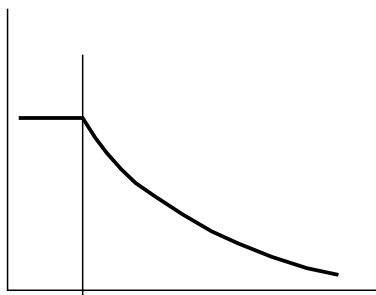
Bei Elektromotoren kann es vorkommen, dass die elektrische Wicklung nicht in gutem Zustand ist. Sie kann an mehreren Stellen unterbrochen oder kurzgeschlossen sein. Die elektromagnetischen Kräfte sind dann nicht ausgeglichen und verschieben den Rotor vom Schwerpunkt weg, d. h. von der Position, an der er eigentlich liegen sollte. Dies sieht wie eine Unwucht aus. Eine Neuauswuchtung des Rotors bringt jedoch keine wesentliche Verbesserung.

Dieser Fehler lässt sich durch einen einfachen Test feststellen. Wir bringen einen Sensor am Motor an und starten eine kontinuierliche Messung der RMS Schwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich von 10–1000 Hz. Das bedeutet, dass wir etwa jede Sekunde einen neuen Messwert auf dem Display sehen. Nun schalten wir die Stromversorgung des Motors ab. Er wird langsamer und kommt nach einiger Zeit zum Stillstand. Dabei können zwei Situationen eintreten:

- Wenn die Stromversorgung abgeschaltet wird, nimmt die Schwingung langsam ab, bis der Motor zum Stillstand kommt.
- Die Schwingung nimmt nach dem Ausschalten der Stromversorgung für einen sehr kurzen Moment zu und fällt dann sofort auf nahezu Null ab.

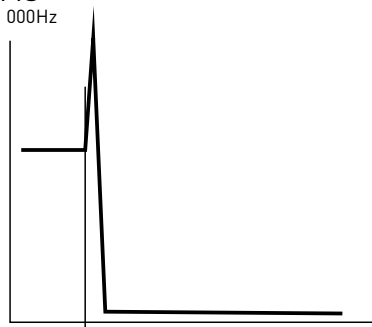
Die beschriebenen Beispiele sind auf den Abbildungen zu sehen.

mm/s
RMS
10-1 000Hz



Abschaltung

mm/s
RMS
10-1 000Hz



Abschaltung

Auf der linken Seite ist ein Fall zu sehen, bei dem die langsame Schwingung abnimmt, was bedeutet, dass der Rotor tatsächlich unwuchtig ist. Es liegt also eine Schwingungsstelle vor.

Rechts ist ein Fall eines plötzlichen Abfalls zu sehen. Dies bedeutet, dass das gesamte Schwingungsproblem mit einem Ausfall der elektrischen Wicklungen von Stator und Rotor zusammenhängt.

Die Neugierigeren unter Ihnen werden nun fragen, was der Spitzenwert im zweiten Fall bedeutet. Die Antwort ist einfach. Als die Stromversorgung abgeschaltet wurde, verschwanden die elektromagnetischen Kräfte. Sie hatten den Rotor aus seiner korrekten Position im Schwerpunkt abgelenkt. Daher kam es zu einem mechanischen Stoß, als der Rotor in den Schwerpunkt zurückkehrte. Dies führte zu einem Anstieg der Schwingung. Die folgenden Werte sind sehr niedrig, da der Rotor mechanisch nicht unwuchtig ist.

Messungen in der Praxis

Zunächst müssen wir eine Struktur der Fabrik erstellen. Das bedeutet, eine Liste der Maschinen zu erstellen, die wir messen werden. Dann erstellen wir eine Liste der Messpunkte für jede Maschine. Für diese Listen verwenden wir die Programme, die wir zusammen mit den Messgeräten kaufen. Adash bietet beispielsweise das Programm DDS an.



In diesem Programm erstellen wir die gesamte Struktur des Unternehmens. Wir können mehrere Ebenen wie Halle 1, Sektion 3 und eine Liste der Maschinen anlegen. Anschließend legen wir Messpunkte an jeder Maschine und die erforderlichen Messungen fest. Dann übertragen wir diese Liste auf den Analysator und können mit der Messung beginnen. Vor Ort wählen wir einfach aus der Liste aus, welche Maschine und welchen Messpunkt wir messen wollen.

Wir müssen vor Ort nichts einrichten. Alles im Analysator wird automatisch entsprechend der im Computerprogramm vorab erstellten Messdefinition eingerichtet.

Die übertragene Liste wird als Route bezeichnet. Sie legt fest, wohin wir gehen und wo wir messen. Wenn wir von der Route zurückkehren, übertragen wir alle Messungen auf den Computer und können mit der Auswertung beginnen.

Das DDS-Programm enthält viele Tools, um die Auswertung zu automatisieren, zu beschleunigen und zu vereinfachen.

Wie oft sollten wir die Route abfahren? Der optimale Zeitraum beträgt wahrscheinlich zwei bis vier Wochen. Wenn unser Unternehmen groß ist, können die Intervalle länger sein. Das maximale Intervall, das nicht überschritten werden sollte, beträgt 2 Monate.

Worauf muss man achten? Wir können bei der Route nicht viele Fehler machen. Wir haben die Parameter im Voraus im Computer definiert. Die einzige wirkliche Gefahr besteht darin, dass wir am falschen Messpunkt oder sogar an der falschen Maschine messen. Die Daten werden dann im Computer am falschen Ort gespeichert. Bei der Datenauswertung werden wir verwirrt sein, warum die neuen Daten so stark von den vorherigen Messungen abweichen.

Messberichte

Unsere Bewertung endet mit der Erstellung eines Berichts für die Instandhaltungsabteilung, in dem die erforderlichen Maßnahmen aufgeführt sind. Wir sollten stets bedenken, dass das Instandhaltungspersonal mit den Konzepten der Schwingungsdiagnostik nicht sehr vertraut ist. Deshalb sollten wir sie damit gar nicht erst belasten. Wir sollten eine Sprache verwenden, die sie verstehen. Wir halten die Berichte so kurz wie möglich. Es ist nicht notwendig, eine lange Liste von Maschinen aufzunehmen, die in gutem Zustand sind. Nur Maschinen, die eine Einstellung oder Reparatur benötigen, sollten in den Bericht aufgenommen werden. Die Instandhaltung bevorzugt einen Bericht mit nur einer kurzen Aussage: ALLES IST IN ORDNUNG. [oder nicht].

Organisation und Auswertung der Messungen

Es ist absolut am besten, wenn ein Unternehmen Schwingungsdiagnosegeräte anschafft und die Messungen sowie deren Auswertung von eigenen Mitarbeitern durchführen lässt. Denn diese stehen in ständigem Kontakt mit den Maschinen und erhalten von der Instandhaltung Informationen darüber, welche Reparaturen oder sogar Austauscharbeiten vorgenommen wurden.

Es ist auch möglich, Schwingungsdiagnostik extern als Dienstleistung zu beziehen. Diese Lösung hat auch Nachteile. Das externe Personal kommt nur in festgelegten Zeitabständen und misst die Route. Es weiß in der Regel nichts über Wartungseingriffe zwischen den Routen. Der Ansatz ist ein ganz anderer. Es werden viele Unternehmen wie Ihres gemessen. Sie verfügen über keine Ausrüstung, um bei Bedarf selbst Messungen durchzuführen. Es könnte zu spät sein, erst beim nächsten Besuch eines externen Analytikers zu messen. Sollten Sie sich dennoch für ein externes Unternehmen entscheiden, haben wir einige Empfehlungen für Sie. Wenn ein externes Unternehmen mit einem Angebot für Messungen zu Ihnen kommt, führen Sie es immer zur Maschine. Lassen Sie es die Messungen vornehmen und seine Meinung zu den Ergebnissen äußern. Verschwenden Sie keine Zeit mit jemandem, der sich damit herausredet, dass er nur das Angebot macht und andere die Messungen durchführen. Es ist immer positiv, wenn die Person, die die Messung anbietet, bereits in Arbeitskleidung erscheint. Lassen Sie sich niemals von der Behauptung täuschen, dass die ganze Schwingungsdiagnostik sehr kompliziert sei und vom Kunden nicht verstanden werden könne.

Es gibt auch Lösungen, bei denen Sie die Messungen selbst durchführen und die Daten nur zur Auswertung einsenden. Man sagt Ihnen immer, dass ein Expertenteam zur Auswertung der Daten zur Verfügung steht. Die Frage ist, wie viele von ihnen jemals in der Fabrik waren. Ich habe einen guten Kommentar von einem erfahrenen Diagnostiker gehört, der seit vielen Jahren in der Branche Messungen durchführt. Er sagte: „Ich würde keine Empfehlung für eine Reparatur von jemandem annehmen, den ich noch nie gesehen habe. Und der zudem meine Maschine noch nie gesehen hat.“ Das ist eine treffende Beschreibung, wie man an diese Dienstleistungen herangehen sollte. Man wird niemals in der Lage sein, in einen Vertrag mit einem externen Unternehmen dessen finanzielle Haftung für das Versäumnis, einen Fehler zu erkennen, oder für die Meldung eines nicht vorhandenen Fehlers aufzunehmen.

Und wie sieht es mit künstlicher Intelligenz aus? Bei Adash haben wir mehrmals versucht, KI einzusetzen. Das erste Mal war um das Jahr 2000. Ich kann mit Fug und Recht sagen, dass sie in der Schwingungsdiagnostik nicht einfach anwendbar sein wird. Der Grund ist einfach: Es wird niemals einen Trainingsdatensatz geben, der genügend Messergebnisse für viele Maschinentypen enthält. Wenn ich das mit der Medizin vergleiche: Wie könnte eine künstliche Intelligenz funktionieren, wenn sie Krankheiten nicht nur bei Menschen, sondern auch bei Tieren diagnostizieren soll? Denn Menschen sind nur eine Art von Organismus, also eine Art von Maschine. In der diagnostischen Praxis gibt es jedoch eine riesige Anzahl von Maschinentypen. In unserer aktuellsten DDS Software stellen wir uns der Thematik und verknüpfen unsere Erfahrung, die Maschinendaten sowie KI für erste mögliche Diagnosen.

Seien Sie also stets sehr misstrauisch und scheuen Sie sich nicht, viele Fragen zu stellen, wenn Sie potenzielle Angebote für externe Diagnostik prüfen.

Kalibrierung

Heutzutage ist dies meist nur noch eine bürokratische Angelegenheit für die verschiedenen Qualitätssysteme und deren Audits. In modernen Messgeräten gibt es keine Einstellelemente, um die Messwerte im Kalibrierlabor gemäß der Norm anzupassen.

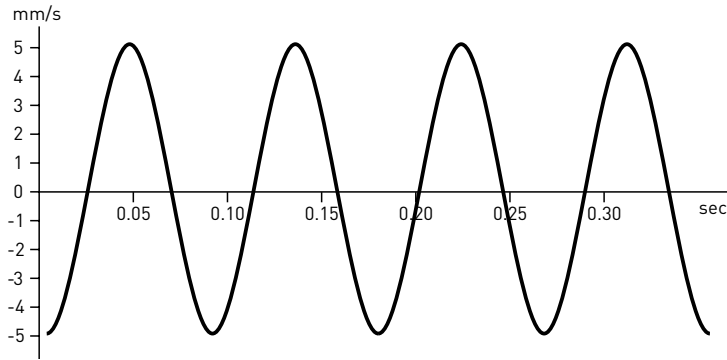
Wenn wir nur ein Gerät haben und überprüfen wollen, ob es korrekt misst, dann ist ein Kalibrierlabor sinnvoll. Es gibt jedoch auch elektronische Geräte, die einen Sensor simulieren. Sie erzeugen exakte Spannungswerte. Wir schließen sie an das Gerät an und prüfen, ob das Gerät den richtigen Wert anzeigt.



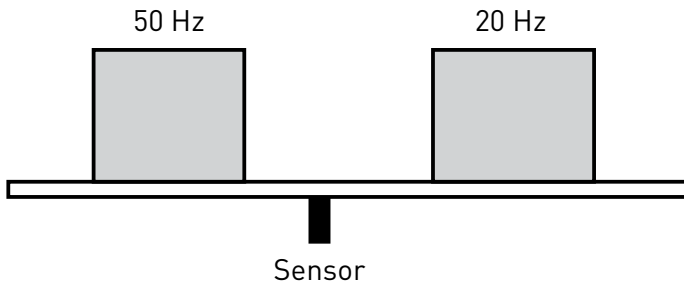
Wenn wir mehr als ein Messgerät und mehr als einen Sensor haben, können wir während der Prüfungen zwischen ihnen wechseln. Wenn etwas nicht stimmt, können wir leicht herausfinden, woran es liegt. Es könnte ein Sensor, ein Anschlusskabel oder das Messgerät sein.

Zeitsignal und Spektrum

Über das Zeitsignal haben wir bereits ausführlich besprochen. Wenn wir es betrachten, sehen wir die Schwingungen im Zeitverlauf. Auf der X-Achse ist also die Zeit dargestellt.



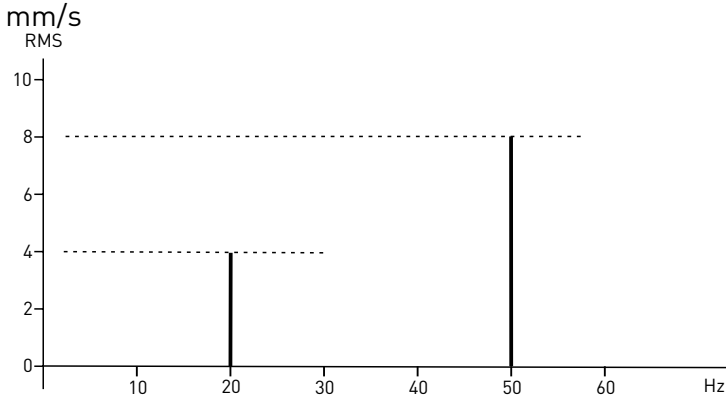
Wir können Schwingungen auch auf eine andere Weise betrachten. Die zweite Möglichkeit besteht darin, das Frequenzspektrum zu berechnen. Die X-Achse des Spektrums ist nicht die Zeit, sondern die Frequenz. Das Spektrum selbst zeigt uns, bei welchen Frequenzen die Schwingungen Energie abgeben, d. h. bei welchen Frequenzen die Schwingungen auftreten und wie stark sie sind, und bei welchen Frequenzen sie vernachlässigbar sind.



Beispielsweise sind zwei Elektromotoren auf einem gemeinsamen Rahmen montiert. Die Drehzahl des ersten beträgt 3000 U/min (50 Hz) und die des zweiten 1200 U/min (20 Hz). Wir platzieren einen Sensor auf dem Rahmen unterhalb der Motoren und messen den RMS-Schwingungswert im Bereich von 10–1000 Hz. Wir lassen nur den ersten Motor laufen. Der gemessene Wert beträgt 8 mm/s_{RMS}. Nun stoppen wir den ersten Motor und lassen den zweiten Motor laufen. Wir messen nun einen Wert von 4 mm/s_{RMS}. Nun lassen wir beide Motoren zusammen laufen. Wir messen den Schwingungswert, der fast 9 mm/s_{RMS} beträgt (genau 8,94 mm/s_{RMS}).

Wenn wir nur diesen Wert von 9 mm/s_{RMS} kennen, können wir ihn nicht in zwei Komponenten aufteilen, die den einzeln laufenden Motoren entsprechen. Wir wissen also nicht, wie die Zustände der einzelnen Motoren sind. Wenn wir jedoch

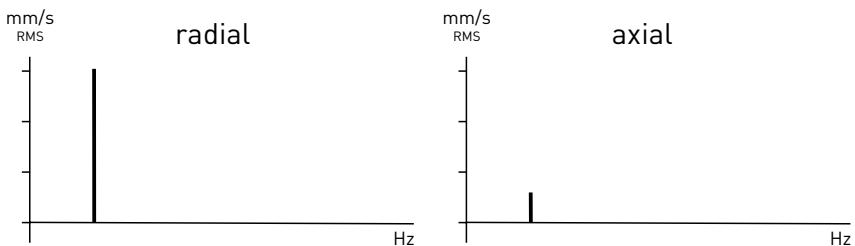
das Zeitsignal in ein Spektrum umwandeln, können wir die einzelnen Komponenten unterscheiden.



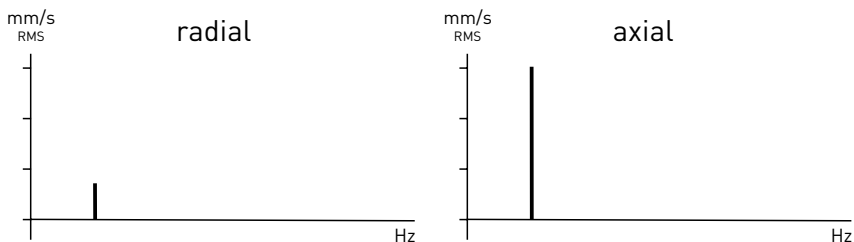
Wir sehen zwei Spektrallinien bei 50 Hz und 20 Hz. Die Amplitude bei 50 Hz beträgt 8 mm/s und die Amplitude bei 20 Hz 4 mm/s. Das Spektrum liefert uns somit einen neuen Einblick in die Schwingungsanteile, die das Zeitsignal nicht erkennen ließ.

Die verschiedenen Fehler an den Maschinen unterscheiden sich insbesondere im Frequenzbild voneinander. Das Spektrum wird somit zu einem leistungsstarken Werkzeug in der Schwingungsanalyse. Bei der Auswertung suchen wir nach hohen Werten, d. h. nach hohen Spektrallinien, und wir suchen nach dem Fehler, der diese verursacht.

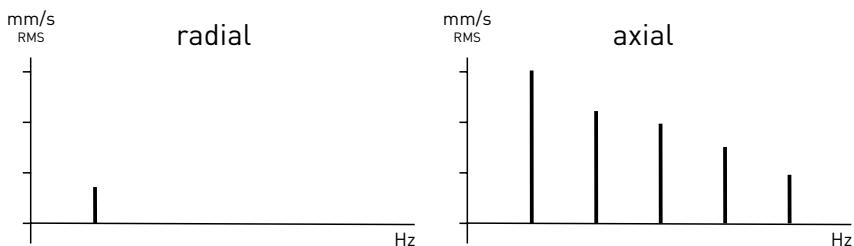
Anhand einiger Beispiele zeigen wir, wie einfach es ist, mechanische Fehler zu unterscheiden, wenn uns ein Spektrum zur Verfügung steht.



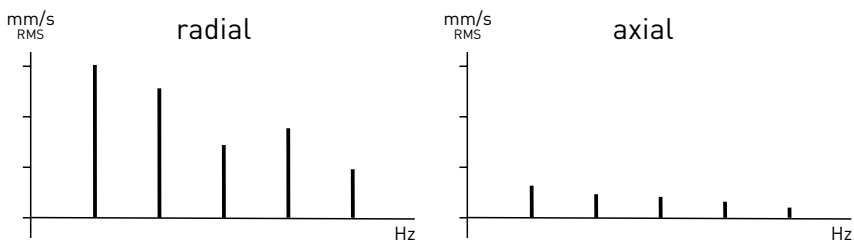
Die hohe Amplitude tritt nur an mit der Drehzahl der Maschine auf. Ist sie in radialer Richtung höher als in axialer Richtung, liegt eine Unwucht vor.



Wenn die Amplitude der Drehzahl in axialer Richtung höher ist, liegt eine Fehlansrichtung vor.



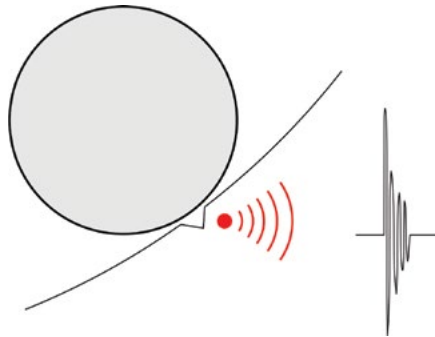
Wenn zusätzlich Linien bei Vielfachen der Drehzahl auftreten (diese werden als Oberschwingungen bezeichnet), liegt eine erhebliche Fehlansrichtung vor. Wir sprechen hier weiterhin von dem Fall, in dem die axiale Schwingung höher ist als die radiale Schwingung.



Wenn harmonische Anteile vorhanden sind und die Schwingung in radialer Richtung stärker ist, handelt es sich um Lockerung.

Erweiterte Diagnose von Wälzlagern mittels Demodulation (Hüllkurvenanalyse)

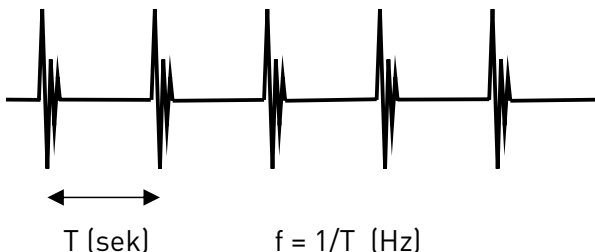
Was ist Wälzlagerverschleiß? Es handelt sich um den Verschleiß der Laufbahnen, auf denen die Kugeln oder Rollen laufen, sowie um den Verschleiß der Oberfläche der Kugeln oder Rollen selbst. Dieser Verschleiß wird als Pitting bezeichnet.



Was passiert, wenn die Kugel auf eine Beschädigung (Schadstelle) in der Laufbahn trifft?

Es kommt zu einem Stoß. Das ist so, als würde man mit einem Hammer auf ein Lager schlagen. Wenn eine Kugel nach der anderen auf die Unebenheit trifft, entsteht ein Zeitsignal, das einzelne Stöße enthält.

Wenn wir die Drehzahl und die Abmessungen des Wälzlagers kennen, können wir berechnen, wie weit die Stöße voneinander entfernt sind. Also, in welchem zeitlichen Abstand sie auftreten. Und jetzt kommt der Clou: Wenn ein Schaden am Außenring, am Innenring, an der Kugel (Wälzkörper) oder am Käfig auftritt oder dieser Risse aufweist, ist das Zeitintervall zwischen den Stößen unterschiedlich. Das bedeutet, wir können sie unterscheiden.



Wenn die Stöße in regelmäßigen Zeitabständen auftreten, können wir die Frequenz berechnen. Das heißt, wie oft ein Stoß in einer Sekunde auftritt.

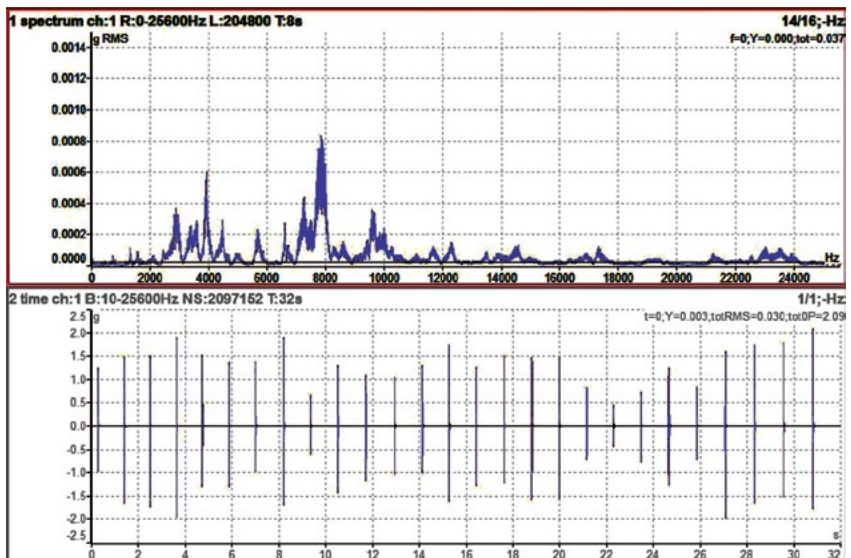
Und da das Zeitintervall bei verschiedenen Defekten variiert, variiert auch die Frequenz. Diese Frequenzen werden als Lagerfehlerfrequenzen bezeichnet. Und das Spektrum ermöglicht es uns, nach ihnen zu suchen.

Es gibt vier Fehlerfrequenzen:

- BPF0 Kugelpassfrequenz außen
- BPFI Kugelpassfrequenz innen
- BSF Kugeldrehfrequenz
- FTF Grundfrequenz (Käfig)

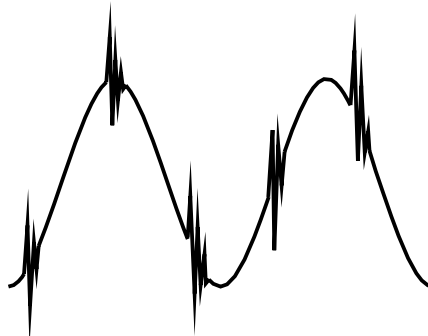
Die Frequenzen der Stöße sind hoch. Daher muss immer das Beschleunigungssignal gemessen werden. Es misst hohe Frequenzen gut.

Doch ganz so einfach ist die Situation nicht. Wir können das Spektrum direkt aus einem Zeitsignal mit Stößen berechnen. Allerdings sind keine Amplituden bei den Fehlerfrequenzen sichtbar. Obwohl es im Zeitsignal deutliche Spitzen gibt (2 g), beträgt der Spitzenwert im Spektrum 0,0008 g_{RMS}.



Der Grund dafür ist folgender: Die Höhe der Linien im Spektrum entspricht den Effektivwerten. Und dies entspricht der im Signal enthaltenen Energie. Erinnern Sie sich an die Erklärung zum Effektivwert und zu den ausgefüllten Flächen. Das Spektrum reagiert nur gut auf Bereiche im Signal, die eine nennenswerte Fläche einnehmen. Es reagiert nicht gut auf hohe Spitzenwerte ohne nennenswerte Fläche unter der Signalform (dem Signal).

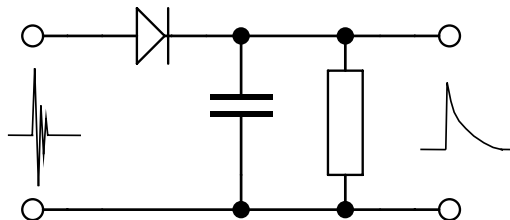
Nun wissen wir also, warum wir das Spektrum nicht direkt aus dem gemessenen Signal berechnen können. Wir müssen zunächst etwas damit tun. Wir müssen einige signifikante Flächen hinzufügen. Der erste Schritt besteht darin, die niedrigen Frequenzen herauszufiltern.



Wir haben diese Situation bereits einmal beschrieben. Wir haben Stöße, aber wir haben auch eine sinusförmige Wellenform bei der Schwinggeschwindigkeitsfrequenz. Das wollen wir nicht im Signal haben. Deshalb filtern wir zunächst alles unterhalb von 500 Hz heraus.



Nun leiten wir das Signal an den Hüllkurvenmodulator weiter. Dieser fügt dem Signal einen bedeutenden Anteil hinzu.

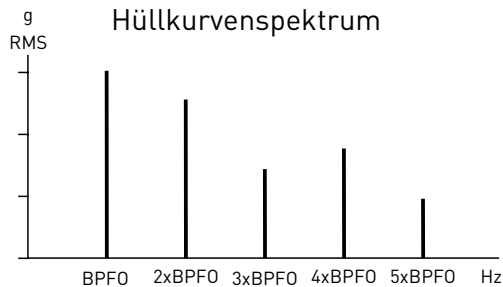


Die einzelnen Stöße werden durch eine Diode (die nur positive Spannung durchlässt) umgewandelt, laden dann den Kondensator C auf und werden anschließend langsam über den Widerstand R entladen. Dies erzeugt am Ausgang ein Signal, das den Stoßhüllkurven ähnelt.



Die Spektralberechnung reagiert viel besser auf dieses Signal, und wir können deutliche Spitzen erkennen.

Befindet sich der Fehler nur auf dem Außenring, können wir dessen Frequenz (BPFO) im Spektrum erkennen, gefolgt von seinen harmonischen Komponenten.



Nun werde ich erklären, warum die Oberwellen im Signal vorhanden sind. Wenn wir ein Spektrum aus einem Signal berechnen, in dem nur eine Sinuswelle mit der Frequenz f vorhanden ist, dann wird es (unter bestimmten anderen Bedingungen) im Spektrum nur eine deutliche Linie bei der Frequenz f geben.

Ist das Zeitsignal jedoch beispielsweise rechteckförmig, dann enthält das Spektrum die Frequenz f und viele Oberwellen. Und dies gilt für alle Signalformen, die nicht sinusförmig sind. Das Spektrum reagiert stets auf Signalverzerrungen, indem es harmonische Komponenten anzeigt. Und ein Hüllkurvensignal ist ein stark verzerrtes Signal. Es ist weit davon entfernt, sinusförmig zu sein.

Der Vorteil der Demodulation besteht darin, dass wir einen Lagerfehler in einem sehr frühen Stadium erkennen können. Ein weiterer Vorteil der Kenntnis der Fehlerfrequenzen ist, dass wir nicht durch andere Frequenzen verwirrt werden. Diese können im Spektrum vorhanden sein und nichts mit dem Lagerfehler zu tun haben (z. B. Stöße, die durch Zahnradverschleiß verursacht werden).

Wir beschreiben nun ein häufiges Missverständnis bezüglich des Demodulationsprozesses. Lagerfehlerfrequenzen können sehr niedrig sein. Der Anwender fragt, ob er einen Sensor verwenden muss, der solche niedrigen Frequenzen messen kann. Das genaue Gegenteil ist der Fall. Die Fehlerlinien im Spektrum werden durch Berechnung erzeugt, nicht durch Messung. Wir benötigen Stöße in der Messung und wandeln dann das Zeitintervall zwischen den Stößen in eine Frequenz um. Bei den Fehlerfrequenzen wird nichts gemessen!

Wenn wir einen Beschleunigungssensor hätten, der ab 500 Hz misst, könnten wir diesen verwenden. Schließlich entfernen wir ohnehin alle Frequenzen unterhalb von 500 Hz vor der Hüllkurvenmodulation.

Fehlerfrequenzen ermöglichen es uns, Situationen zu bewältigen, in denen wir zwei verschiedene Lager nebeneinander haben. Wir können im Spektrum deutlich erkennen, welches beschädigt ist und ausgetauscht werden muss.

Die Schwingungen abhören

Dies ist eine alte Methode der Schwingungsbeurteilung. Ein Schraubendreher wurde mit der Spitze nach unten auf die Maschine gedrückt und die Rückseite an das Ohr gehalten.

Auch heute noch ermöglichen uns unsere Adash-Geräte, Schwingungen abzuhören. Das Signal vom Sensor wird in die Kopfhörer eingespeist. Die Wälzlager (ihr Geräusch oder Pfeifen) lassen sich sehr gut abhören. Verschiedene sich wiederholende Phänomene, verschiedene Klopfgeräusche im Inneren der Maschine sind gut zu hören. Natürlich kann man das Signal von mechanischen Fehlern nicht abhören. Das bedeutet, wir hören sie nicht, unser Ohr ist bei so niedrigen Frequenzen nicht empfindlich und die Kopfhörer übertragen sie mit großer Dämpfung.

Ultraschall

Ultraschall ist ein Signal mit Frequenzen über 25 kHz. Es gibt spezielle Mikrofone, die solche hohen Frequenzen erfassen können. Sie sind bei Frequenzen um 40 kHz am empfindlichsten. Sie können zur Messung von Lagern verwendet werden, bieten jedoch keine Vorteile gegenüber Messungen mit Beschleunigungssensoren. Sie sind nützlich, um Leckagen in der Druckverteilung zu finden. Adash-Schwingungsanalysatoren ermöglichen ebenfalls diese Messung.

Neuberechnungen der Werte für Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg

Um eine solche Neuberechnung einfach durch Multiplikation mit einer Konstante durchzuführen, muss das Signal eine sinusförmige Form aufweisen. Ist dies nicht der Fall, lässt sich die Neuberechnung nicht einfach durchführen. Mathematisch ist dies natürlich möglich, aber man muss wissen, wie man Ableitungen und Integrale einsetzt.

Nehmen wir also ein Beschleunigungssignal mit einem bestimmten RMS-Wert oder 0-P. Zur Erinnerung: 0-P = RMS/0,71. Die Frequenz der Sinuswelle ist f . Dann sind die Schwinggeschwindigkeitswerte gleich:

$$\text{vel}_{\text{RMS}} = \frac{\text{acc}_{\text{RMS}}}{2 * \pi * f} \quad \text{und} \quad \text{vel}_{0-P} = \frac{\text{acc}_{0-P}}{2 * \pi * f}$$

Dann gelten für den Schwingweg die folgenden Formeln:

$$\text{disp}_{\text{RMS}} = \frac{\text{vel}_{\text{RMS}}}{2 * \pi * f} \quad \text{und} \quad \text{disp}_{0-P} = \frac{\text{vel}_{0-P}}{2 * \pi * f}$$

Beachten Sie erneut die Bedingung für die Sinuswellenform.

Warum messen wir bei dem Schwingweg niedrige Frequenzen und hohe Frequenzen bei der Schwingbeschleunigung?

Am besten lässt sich dies anhand von Beispielen verstehen. Betrachten Sie zwei Maschinen, die unterschiedliche Schwingungswerte aufweisen.

- A) Die Maschine läuft mit einer sehr niedrigen Drehzahl von 300 U/min (5 Hz) und der Effektivwert der Verschiebung beträgt 100 μm .
- B) Der Hochgeschwindigkeits-Turbokompressor läuft mit 120.000 U/min, was 2.000 Hz entspricht, und der Effektivwert der Beschleunigung beträgt 1 g.

Wenn wir Maschine A mit einem Wegsensor messen, der eine Empfindlichkeit von 8 mV/ μm hat, erhalten wir bei einem Wert von 100 μm 800 mV. Ein elektrisches Signal mit einer Amplitude von 800 mV lässt sich sehr leicht messen. Versuchen wir nun, Maschine A mit einem Beschleunigungssensor zu messen. Berechnen wir zunächst, welchen Beschleunigungswert Maschine A aufweist. Aus den obigen Formeln ergibt sich:

$$\text{acc}_{\text{RMS}} = \text{disp}_{\text{RMS}} \cdot [2 \cdot \pi \cdot f]^2$$

Setzen wir die Zahlen ein:

$$\begin{aligned} \text{acc}_{\text{RMS}} &= 100 \mu\text{m} \cdot [2 \cdot \pi \cdot 5]^2 \doteq 100 \mu\text{m} \cdot [31,4]^2 \doteq 100 \mu\text{m} \cdot 900 = \\ 90\,000 \mu\text{m/s}^2 &= 90 \text{ mm/s}^2 = 0,09 \text{ m/s}^2 = 0,009 \text{ g RMS} \end{aligned}$$

Der Wert von 0,009 g ist schwer zu messen. Bei einer Sensorempfindlichkeit von 100 mV/g ergibt dies einen Wert von 0,9 mV, der möglicherweise bereits im Rauschen untergeht. Wenn wir Maschine B mit einem Beschleunigungssensor mit einer Empfindlichkeit von 100 mV/g messen, erhalten wir bei einem Wert von 1 g 100 mV, was leicht zu messen ist. Was passiert, wenn wir versuchen, Maschine B mit einem Wegsensor zu messen?

Die Formel lautet:

$$\text{disp}_{\text{RMS}} = \text{acc}_{\text{RMS}} / [2 \cdot \pi \cdot f]^2$$

Setzen wir die Zahlen ein:

$$\begin{aligned} \text{disp}_{\text{RMS}} &= 1 \text{ g} / [2 \cdot \pi \cdot 2\,000]^2 \doteq 10 \text{ m/s}^2 / [12\,000]^2 = 10 \text{ m/s}^2 / 144\,000\,000 = \\ 6,9 \cdot 10^{-8} \text{ m} &= 6,9 \cdot 0,000\,000\,01 = 0,000\,000\,069 \text{ m} = 0,000\,069 \text{ mm} = 0,069 \mu\text{m}. \end{aligned}$$

Bei einer Sensorempfindlichkeit von 8 mV/ μm würden wir 0,5 mV erhalten, was sehr gering ist und möglicherweise bereits vom Rauschen überlagert wird. Daher wäre es auch keine gute Idee, die Maschine B mit einem Wegsensor zu messen.

Berechnen Sie auf ähnliche Weise, wie groß der Schwingweg bei 1 Hz sein müsste, wenn der Beschleunigungswert 3 g beträgt. Wenn Sie einen Effektivwert von 0,76 m erhalten haben, dann haben Sie richtig gerechnet. Der Effektivwert von 0,76 m RMS beträgt ungefähr 1 m 0-P. Das bedeutet, dass die Maschine um die Mittelposition herum um +/- 1 m schwingen würde. Ich wollte nur zeigen, dass höhere Beschleunigungswerte bei niedrigen Frequenzen unmöglich sind, da es dazu enorme Verschiebungswerte bräuchte. Ebenso sind höhere Schwingwege bei hohen Frequenzen unmöglich, da es dazu enorme Beschleunigungswerte bräuchte.

Online-Messungen

Bisher haben wir nur über Messungen mit einem tragbaren Schwingungsanalysator gesprochen. Es gibt jedoch auch Geräte, die kontinuierlich messen. Das bedeutet, dass Sensoren an der Maschine angebracht werden und der Zustand der Maschine kontinuierlich überwacht wird. Dies hat den Vorteil, dass Sie den Zustand kontinuierlich überwachen und ein Problem sofort erkennen können. Kontinuierliche Messung bedeutet, dass wir beispielsweise jede Sekunde einen neuen Schwingungswert messen. Bei der Routenmessmethode erhalten wir einen neuen Wert z. B. einmal alle zwei Wochen.

Natürlich hat dieser Vorteil seinen Preis. Die Preise für Online-Systeme sind höher als die für tragbare Systeme. Während für Routenmessungen ein tragbares Messgerät ausreicht, benötigen wir für jede Maschine ein Online-System.

Bei der Einrichtung eines Online-Systems sind zwei grundlegende Fakten zu beachten:

- 1) Die Prozessorleistung ist nicht unbegrenzt
- 2) die Festplattenkapazität für die Datenspeicherung ist nicht unbegrenzt

Obwohl beide Aussagen klar sind und niemand sie in Frage stellt, würden Sie sich wundern, wie viele Anwender sie bei der Einrichtung ihres Online-Systems vergessen. Sie berechnen beispielsweise nicht, wie viel Speicherplatz sie pro Tag verbrauchen.



Online-System ADASH A3716



Online-System ADASH A3800

Frühere Systeme haben nicht vollständig kontinuierlich gemessen. Der Nutzer legte fest, wie oft der Wert gemessen werden sollte, z. B. alle 10 Minuten.

Aktuelle Adash-Systeme messen kontinuierlich. Während des Entwicklungsprozesses haben wir auch viel Aufwand in die Entwicklung von Algorithmen zur Verarbeitung großer Datenmengen gesteckt.

Die Grundidee ist folgende: Es macht keinen Sinn, Messwerte zu speichern, die sich nicht ändern. Wenn der Wert 3 mm/s beträgt, reicht es aus, ihn z. B. einmal pro Stunde oder sogar in größeren Zeitabständen zu speichern. Wenn man sich die Grafiken ansieht, weiß man natürlich, dass ein Abstand von 3 Stunden zwischen den Messungen nicht bedeutet, dass alle 3 Stunden eine Messung durchgeführt wurde.

Man weiß, dass die Messung die ganze Zeit über erfolgte und der Wert stabil war. Die Adash-Speicheralgorithmen wenden diesen Ansatz auf alle Arten von Messungen an. Dem Benutzer dürfen keine Daten entgehen, die auf eine Veränderung des Maschinenzustands hindeuten. Datenreduktion bedeutet auch einen schnelleren Zugriff auf Daten in der Datenbank und eine schnellere Darstellung von Trends.

Auswuchten

Die Schwingungsmessung erleichtert auch das Auswuchten von Rotoren erheblich. Wir werden nicht zu sehr ins Detail gehen. In der Praxis werden Rotoren mit einer oder zwei Auswuchtebenen betriebsmäßig ausgewuchtet. Das Ein-Ebenen-Auswuchten wird bei schmalen Rotoren durchgeführt, bei denen der Radius deutlich größer ist als die Breite. Das Zwei-Ebenen-Auswuchten wird bei Rotoren durchgeführt, die breiter sind. Das Zwei-Ebenen-Auswuchten sehen wir in der Praxis beim Auswuchten von Autorädern. Ein Gewicht wird innen und das andere außen angebracht.

Wir beschreiben den Fall einer Ebene, der einfacher ist. Wir schließen einen Sensor an das Rotorlager und eine Tachosonde an, um die Drehzahl zu messen. Die Tachosonde ist wichtig, da wir nur Amplitude und Phase bei Drehzahlfrequenz messen werden. Bei Adash-Geräten wird diese Messung als „Amp+Phase“-Messung bezeichnet. Wir drehen den Rotor auf Betriebsdrehzahl und messen die Ausgangswerte. Dann montieren wir eine Testmasse am Rotor. Ihr Gewicht sollte etwa das Fünffache des Wertes der zulässigen Restunwucht betragen (jeder Rotor ist immer ein wenig unausgewuchtet; der Begriff „zulässige Restunwucht“ bezeichnet den Wert, bei dem wir keine Auswuchtung vornehmen müssen und die Maschine ohne Einschränkungen betreiben können). Anschließend drehen wir den Rotor erneut und messen die Amplituden- und Phasenwerte des Testlaufs. Nun berechnet der Analysator, wie schwer die Masse sein muss und wo sie platziert werden sollte.

Die Position der Auswuchtmasse wird anhand der reflektierenden Markierung auf der Welle abgelesen, die von der Tachosonde erfasst wird. Sie wird in Grad angegeben, und der volle Umlauf des Rotors beträgt 360°.

Das Auswuchten in zwei Ebenen verläuft ähnlich, es werden jedoch mehr Messungen durchgeführt. Die Testgewichte müssen nacheinander in der ersten und dann in der zweiten Ebene platziert werden. Das Ergebnis sind zwei Gewichte und zwei Positionen. Je eines für jede Ebene.

Es empfiehlt sich, den Auswuchtvorgang zunächst im Büro zu testen, z. B. an einem Tischventilator. Die Unwucht kann z. B. mit Knetmasse simuliert werden. Das endgültige Auswuchtgewicht sollte das gleiche Gewicht haben und gegenüber der Knetmasse-Simulation positioniert sein.

Für das Auswuchten wird die Norm ISO 21940 verwendet, die sowohl die Verfahren als auch die empfohlenen zulässigen Restunwuchten für verschiedene Maschinentypen und Drehzahlwerte beschreibt.

Einstellung der grundlegenden Messparameter

Sensoreinstellungen

ICP ein/aus – Die meisten Sensoren enthalten eine interne Elektronik, die eine Stromversorgung benötigt, die als ICP® (eingetragenes Warenzeichen von PCB) bezeichnet wird. Wenn der Sensor keine Stromversorgung benötigt und wir die ICP Stromversorgung eingeschaltet lassen, kann der Sensor beschädigt werden. Wenn wir einen Signalgenerator an den Eingang des Analysators anschließen, lassen wir die ICP immer ausgeschaltet.

Einheit – Ein Sensor ist ein Gerät, das eine physikalische Größe in eine Spannung oder einen Strom umwandelt. Am Ausgang des Schwingungssensors liegt eine Spannung an, und wir müssen festlegen, welche physikalische Größe in diese Spannung umgewandelt wird. Meistens handelt es sich um Beschleunigungssensoren, daher stellen wir g oder m/s^2 ein.

Empfindlichkeit – Hier legen wir den Umrechnungsfaktor zwischen der Einheit und der Ausgangsspannung fest; für g beträgt dieser üblicherweise 100 mV/g. Das heißt, wenn der Signalwert 1 g beträgt, liegen am Ausgang des Sensors 100 mV an.

Allgemeine Messeinstellungen

Eingang – Die Kanalnummer, auf der wir die Messung durchführen möchten.

Einheit – Die physikalische Einheit, in der wir die Messung durchführen möchten. Achtung – nicht zu verwechseln mit der Sensoreinheit, die z. B. g ist; das Gerät kann das Signal in mm/s oder μm umrechnen. Zur Messung des Lagerzustands wählen wir also g, zur Messung mechanischer Fehler wählen wir mm/s.

Signalbewertung – Auswahl der Auswertungsmethode. Meistens wählen wir RMS, andere werden nur in Sonderfällen verwendet.

Band Fmin, Fmax – Hier stellen wir die Frequenzen des Bandpassfilters ein. Es filtert alle Frequenzen unterhalb von Fmin und alle Frequenzen oberhalb von Fmax aus dem Eingangssignal heraus. Anschließend wird der Wert, z. B. RMS, ausgewertet. Dies hängt davon ab, welche Fehler uns interessieren. Für Messungen des Lagerzustands wählen wir hohe Frequenzen, z. B. 5–25,6 kHz. Bei langsam laufenden Lagern wählen wir einen niedrigeren Fmin-Wert, z. B. 500 Hz. Für die

Messung mechanischer Fehler wählen wir üblicherweise 10–1000 Hz, bei langsam laufenden Maschinen (Drehzahlen unter 600 U/min, d. h. unter 10 Hz) wählen wir F_{min} z. B. 1 Hz. Je niedriger der Wert, desto länger dauert die Messung. Die Wartezeit ist erforderlich, damit sich der Sensor stabilisieren kann, nachdem er an der Messplatte angebracht wurde. Bei einem Wert von 10 Hz beträgt sie 1 Sekunde. Bei einem Wert von 1 Hz beträgt sie 10 Sekunden.

Abtastung – Durch die Einstellung der Anzahl der Abtastungen legen wir fest, wie lange die Messung dauern soll, um das Ergebnis zu berechnen. In der Regel ist eine Dauer von 1 s ausreichend. Die Messung sollte immer mindestens 10 Rotorumdrehungen umfassen.

Einstellungen für die Zeitsignalmessung

Wir haben die Messung des Zeitsignals am Beispiel einer Feder / Masse und Schwingungsaufzeichnung erläutert. Die grundlegenden Parameter Kanal, Einheit, Band F_{min} , Band F_{max} und Abtastungen wurden bereits in den vorherigen allgemeinen Messeinstellungen erklärt.

Abtastfrequenz – Dieser Wert bestimmt, wie das analoge Signal in ein digitales Signal umgewandelt wird. Der Analysator legt die Abtastfrequenz immer selbst fest, entsprechend dem eingestellten Wert für Band F_{max} . Wir empfehlen, diesen Wert nicht zu ändern, bis Sie ein tieferes Verständnis der Messung haben.

Einstellungen für die Spektrummessung

Wir haben bereits erläutert, dass es sich hierbei um die Umwandlung eines Zeitsignals in ein Spektrum handelt. Die Berechnung erfolgt mittels FFT (Fast Fourier Transform). Wir müssen nicht mehr über die Berechnung wissen. Die Parameter „Kanal“ und „Einheit“ wurden bereits in der vorherigen Einstellung des Gesamt-messwerts erläutert.

Fenster – Behalten Sie die Option „Hanning“ bei; das Verständnis der Fensterfunktion erfordert tiefergehende Kenntnisse und ist für die Diagnose nicht erforderlich.

Band F_{min} – Es handelt sich lediglich um die Einstellung des F_{min} -Bands. Wenn Sie nicht an Frequenzen unter 10 Hz interessiert sind, belassen Sie den Wert bei 10 Hz, andernfalls geben Sie einen niedrigeren Wert ein. Ein niedrigerer Wert verlängert die Messzeit, wie wir bereits bei der Gesamt Kennwertmessung erläutert haben.

Bereich – Einstellung des Frequenzbereichs des Spektrums. Normalerweise reichen 1000 Hz für Messungen in mm/s aus; bei Messungen in g möchten wir hohe Frequenzen sehen, daher geben wir z. B. 25600 Hz ein.

Linien – Diese Einstellung entspricht der Bildauflösung. Eine hohe Auflösung ermöglicht es uns, das Bild zu vergrößern und Details zu erkennen. Wenn wir ein Bild mit niedriger Auflösung vergrößern, sehen wir nur Rechtecke ohne innere Struktur. Ähnlich verhält es sich mit dem Spektrum, wenn zwei Frequenzen dicht beieinander liegen. Wenn wir diese trennen müssen, müssen wir eine höhere Auflösung wählen, um dies zu ermöglichen. Der unter der Zeilenzahl angezeigte df -Wert gibt die Frequenzdifferenz zwischen benachbarten Zeilen an. Wenn wir zwei Frequenzen

auflösen müssen, die z. B. 2 Hz auseinanderliegen, sollte der df-Wert mindestens 0,5 Hz betragen. Eine höhere Auflösung bedeutet immer eine längere Messzeit. Die Messzeit lässt sich leicht ohne einen Taschenrechner leicht berechnet werden. Wir nehmen den Wert von df (d. h. den Abstand zwischen den Linien) in Hz und berechnen $T=1/df$, wobei T die Messzeit ist. Wenn Sie beispielsweise den Bereich und die Anzahl der Linien so einstellen, dass $df=0,01$ Hz ist, dauert die Messung 100 Sekunden.

Mittelwertbildung – Schwingungen sind möglicherweise nicht immer völlig stabil oder enthalten viel Rauschen. Es empfiehlt sich, die Mittelwertbildung zu verwenden. Wenn wir beispielsweise den Wert 8 einstellen, werden 8 Einzelmessungen durchgeführt. Aus diesen wird ein arithmetischer Mittelwert berechnet und gespeichert. Der Mittelwert von 8 ist in den meisten Fällen ausreichend.

Einstellungen für die Hüllkurvenmessung (Demodulationsmessung)

Das Konzept der Hüllkurvenanalyse finden Sie auch in der Fachliteratur. Es handelt sich um genau dieselbe Messung.

Die Parameter Kanal, Fenster, Einheit und Mittelwertbildung wurden bereits zuvor erläutert. Hüllkurven-Spektren können nur in der Schwingbeschleunigung gemessen werden, daher ist die Auswahl an Einheiten begrenzt.

Warnung: Wie bereits in einem separaten Kapitel erläutert, verwechseln Sie nicht die Bedeutung von „Demod Fmin“, „Fmax“ und die Bedeutung von „Bereich“.

Demod Fmin, Fmax – Die Frequenzen des Eingangsfilters; die Aufgabe dieses Filters bei der Demodulation besteht darin, die Frequenzen der Drehzahl und der harmonischen Komponenten zu entfernen. Es sollen nur die Stöße übrig bleiben, da nur diese für die anschließende Hüllkurvenmodulation benötigt werden.

Bereich – Spektralbereich nach Anwendung der Hüllkurve. Hier sollen die Wälzlagerfehlerfrequenzen sichtbar werden, diese liegen in der Regel unter 100 Hz. Der Bereich reicht daher bis zu einigen hundert Hz aus.

Linien – Es sind nicht viele Linien erforderlich. Die Fehlerfrequenzen liegen ziemlich weit auseinander, daher benötigen wir keine hohe Auflösung. 1600 Linien reichen völlig aus.

Was lässt sich abschließend sagen?

Wenn die Messung sorgfältig und zuverlässig durchgeführt wird, können wir Maschinenfehler und Störungen frühzeitig erkennen, was letztendlich Zeit und Geld spart. Es ist keine Übertreibung zu sagen, dass die Messung zu Ihrem unverzichtbaren Helfer wird.

Sicherlich werden Sie nach Ihrer ersten Messung noch kein Meister sein, aber wir glauben, dass sich Ihre Fähigkeiten mit der Zeit verbessern werden und Sie dieses Handbuch an neue Anfänger weitergeben können. 😊

Schließlich wissen wir, wovon wir sprechen. Die Welt der Schwingungen ist unsere Welt. Außerdem werden Sie dabei nicht auf sich allein gestellt sein. Auf unserer Website finden Sie zahlreiche Artikel, Videos und weitere Handbücher zu diesem Thema.

VIDEOS



HANDBÜCHER UND DATENBLÄTTER



WEBSITE



EIN KURZER LEITFADEN ZUR SCHWINGUNGS- DIAGNOSTIK



This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

ADASH spol. s r. o.

Hlubinská 32/1379

Ostrava, 702 00, Tschechische Republik

+420 596 232 670

info@adash.com

www.adash.com

Übersetzung: Daniel Basic

1. Auflage, 2025

© ADASH spol. s r. o.