

DIN ISO 13373-2



ICS 17.160

**Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen –
Schwingungs-Zustandsüberwachung –
Teil 2: Verarbeitung, Analyse und Darstellung von
Schwingungsmesswerten (ISO 13373-2:2005)**

Condition monitoring and diagnostics of machines –

Vibration condition monitoring –

Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data (ISO 13373-2:2005)

Surveillance des conditions et diagnostic des machines –

Surveillance relative aux conditions des vibrations –

Partie 2: Traitement, analyse et présentation des données vibratoires (ISO 13373-2:2005)

Gesamtumfang 39 Seiten

Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
Normenausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN

Nationales Vorwort

Die dieser Norm zugrunde liegende Internationale Norm ISO 13373-2 wurde vom ISO/TC 108/SC 2 „Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures“ erarbeitet. Für die deutsche Mitarbeit ist der Gemeinschaftsausschuss NALS/VDI C 6 UA 5 „Schwingungsüberwachung“ zuständig.

ISO 13373 besteht aus den folgenden Teilen mit dem Titel *„Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen — Schwingungs-Zustandsüberwachung“*:

— Teil 1: Allgemeine Anleitungen

— Teil 2: Verarbeitung, Analyse und Darstellung von Schwingungsmesswerten

Ein weiterer Teil befindet sich in Vorbereitung, der auch Festlegungen zur Diagnostik enthalten wird.

Zu den im Inhalt genannten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 1683	siehe	DIN EN 21683
ISO 5348	siehe	DIN ISO 5348
Normen der Reihe ISO 7919	siehe	Normen der Reihe DIN ISO 7919
Normen der Reihe ISO 10816	siehe	Normen der Reihe DIN ISO 10816
ISO 10817-1	siehe	DIN ISO 10817-1
ISO 13373-1	siehe	DIN ISO 13373-1
ISO 16063-21	siehe	DIN ISO 16063-21

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 21683, *Akustik — Bevorzugte Bezugswerte für akustische Pegel*

DIN ISO 5348, *Mechanische Schwingungen und Stöße — Mechanische Ankopplung von Beschleunigungsaufnehmern*

Normen der Reihe DIN ISO 7919, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an rotierenden Wellen*

Normen der Reihe DIN ISO 10816, *Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen*

DIN ISO 10817-1, *Messeinrichtung für die Schwingungen rotierender Wellen — Teil 1: Erfassung der relativen und der absoluten Radialschwingungen*

DIN ISO 13373-1, *Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen — Schwingungs-Zustandsüberwachung — Teil 1: Allgemeine Anleitungen*

DIN ISO 16063-21, *Verfahren zur Kalibrierung von Schwingungs- und Stoßaufnehmern — Teil 21: Schwingungskalibrierung durch Vergleich mit einem Referenzaufnehmer*

DIN ISO 17359, *Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen — Allgemeine Anleitungen*

Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen —
Schwingungs-Zustandsüberwachung —
 Teil 2: Verarbeitung, Analyse und Darstellung von Schwingungsmesswerten

Inhalt

	Seite
Einleitung.....	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen.....	6
3 Behandlung des Messsignals	6
3.1 Allgemeines.....	6
3.2 Analoge und digitale Systeme.....	8
3.3 Signal-Anpassungseinheit.....	9
3.4 Filterung.....	11
4 Datenverarbeitung und Diagnostik	12
4.1 Allgemeines	12
4.2 Analyse im Zeitbereich.....	12
4.3 Analyse im Frequenzbereich	22
4.4 Darstellung von Messergebnissen bei Änderungen des Betriebszustands	31
4.5 Echtzeit-Analyse und Echtzeit-Bandbreite	35
4.6 Ordnungsanalyse (analog und digital)	36
4.7 Oktav- und Teiloktav-Analyse	36
4.8 Cepstrum-Analyse	37
5 Weitere Techniken	38
Literaturhinweise	39

Einleitung

Das allgemeine Ziel dieses Teils von ISO 13373, der das Gebiet der Schwingungs-Zustandsüberwachung von Maschinen umfasst, ist es, empfohlene Verfahren und Vorgehensweisen für die Verarbeitung von Messsignalen und die Analyse solcher Daten bereitzustellen, die von Schwingungsaufnehmern kommen, die an einer Maschine an ausgewählten Messpunkten angebracht sind und zur Überwachung des dynamischen Verhaltens der Maschine dienen.

Breitbandige Schwingungsmessungen ermöglichen einen Überblick über die Stärke der Schwingungen einer Maschine. Sie können beobachtet und ihr Zeittrend kann genutzt werden, um den Betreiber beim Auftreten anomaler Zustände der Maschine zu warnen. Eine weitere Verarbeitung und Analyse dieser Schwingungssignale in Übereinstimmung mit den in diesem Teil von ISO 13373 enthaltenen Vorgehensweisen geben dem Betreiber einen Einblick in Möglichkeiten zur Diagnose der möglichen Ursache oder möglichen Ursachen von Maschinenstörungen, wodurch es möglich ist, die Zustandsüberwachung zielgerichteter fortzusetzen.

Der Vorteil eines solchen Überwachungsprogramms ist es nicht nur, dass der Maschinenbetreiber auf den möglichen Ausfall einer Maschine zu einem gewissen Zeitpunkt hingewiesen und dadurch die Instandsetzung bereits vor dem Ausfall geplant werden kann, vielmehr werden auch wertvolle Hinweise dazu gegeben, welcher Art die zu planende und auszuführende Instandsetzung sein sollte. Die Schwingungen sind Widerspiegelungen oder Symptome von Problemen, wie mangelhafte Ausrichtung, Unwucht, fortschreitender Verschleiß, Durchfluss- und Schmierungsfehler.

ISO 13373-1 enthält Anleitungen für die Schwingungs-Zustandsüberwachung von Maschinen. Der vorliegende Teil von ISO 13373 enthält dagegen Anleitungen für die Verarbeitung, Analyse und Darstellung der so erhaltenen Schwingungsdaten. Diese können bei der Diagnostik zur Ermittlung des ursächlichen Auslösers des Problems herangezogen werden.

Die Vorgehensweisen zur Signalverarbeitung, Analyse und Diagnostik, welche zur Schwingungs-Zustandsüberwachung genutzt werden, können in Abhängigkeit des zu überwachenden Prozesses, der erforderlichen Genauigkeit, der verfügbaren Ressourcen und aus anderen Gründen variieren. Ein gut gewähltes und realisiertes Zustands-Überwachungsprogramm sollte solche Faktoren, wie die Beachtung der Wichtigkeit des Prozesses, der Kritikalität und Komplexität des Systems, der Kosten-Nutzen-Relation, der Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Ausfallmechanismen und der Identifikation von Kennzeichen für beginnende Ausfälle, enthalten.

Eine angepasste Prozessanalyse sollte der Festlegung des gewünschten Datentyps für eine geeignete Überwachung des Maschinenzustandes vorausgehen.

Der Schwingungs-Analytiker sollte so viel sachdienliche Informationen wie möglich über die zu überwachende Maschine sammeln. So ermöglichen zum Beispiel die Kenntnis der Resonanzfrequenzen und der Erregerfrequenzen sowie weitere analytische Informationen aus der Entwurfsphase einen Überblick über die zu erwartenden Frequenzen und — konsequenterweise — damit über den zu überwachenden Frequenzbereich. Auch die Kenntnis des Anfangszustandes der Maschine, des bisherigen Betriebsablaufs und der dabei herrschenden Betriebszustände gibt dem Analytiker zusätzliche Informationen.

Andere Vorteile dieses Planungsprozesses vor einer Schwingungsmessung sind, dass sich Hinweise auf die erforderlichen Aufnehmertypen, ihre optimalen Anbringungspunkte, die erforderliche Art von Signal-Anpassungseinheiten, die vorteilhaftesten Signalverarbeitungsverfahren und die relevanten Zustandskriterien ergeben.

Auf dem Gebiet der Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen sind weitere Normen in Vorbereitung. Sie haben die allgemeine Zielsetzung, Anleitungen zur umfassenden Überwachung der „Gesundheit“ von Maschinen zu geben; dazu gehören u. a. Schwingungen, die Öl-Reinheit, Thermografie und Leistungskenngrößen. Ein weiterer Teil von ISO 13373 befindet sich derzeit in Vorbereitung, der auch Festlegungen zur Diagnostik enthalten wird.

1 Anwendungsbereich

In diesem Teil von ISO 13373 werden Vorgehensweisen für die Verarbeitung und Darstellung von Schwingungsdaten und für die Analyse von Schwingungskenngrößen zum Zwecke der Überwachung des Schwingungszustandes rotierender Maschinen und — soweit möglich — zur Ausführung der Diagnostik empfohlen. Es werden verschiedene Techniken für unterschiedliche Anwendungen beschrieben. Techniken zur Signalverbesserung sowie Analysiermethoden für die Untersuchung des Schwingungsverhaltens spezieller Maschinen werden ebenfalls beschrieben. Manche dieser Techniken können auch bei anderen Maschinenarten, einschließlich Maschinen mit hin- und hergehenden Teilen, angewendet werden. Außerdem sind Beispiele für Darstellungsformate, in welchen die Kenngrößen üblicherweise für die Bewertung und Diagnose ausgegeben werden, angegeben.

Dieser Teil von ISO 13373 ist in die zwei grundlegenden Vorgehensweisen bei der Verarbeitung und Analyse von Schwingungssignalen unterteilt: den Zeitbereich und den Frequenzbereich. Darüber hinaus werden Vorgehensweisen angegeben, durch die sich genauere Diagnoseergebnisse ergeben, indem der Betriebszustand verändert wird.

Dieser Teil von ISO 13373 hat nur die gebräuchlichsten Techniken für die Schwingungs-Zustandsüberwachung, die Schwingungsanalyse und die Diagnostik von Maschinen zum Inhalt. Es gibt viele weitere Techniken, die zur Ermittlung des Maschinenzustandes angewandt werden können und bei einer tiefergehenden Schwingungsanalyse und -diagnose, also jenseits der üblicherweise anfallenden Maschinenzustandsüberwachung, Anwendung finden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Techniken liegt außerhalb des Anwendungsbereichs dieses Teils von ISO 13373. Allerdings werden einige dieser fortgeschrittenen Spezialtechniken in Abschnitt 5 zur weitergehenden Information aufgelistet.

Für spezielle Maschinenarten und -größen geben die Normen der Reihen ISO 7919 und ISO 10816 Hinweise zur Nutzung breitbandig gemessener Schwingungen bei der Zustandsüberwachung. Weitere Regelwerke, wie die Richtlinien VDI 3839 und VDI 3841, enthalten zusätzliche Informationen zu maschinenspezifischen Problemen, die bei der Schwingungsdiagnostik auftreten können.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

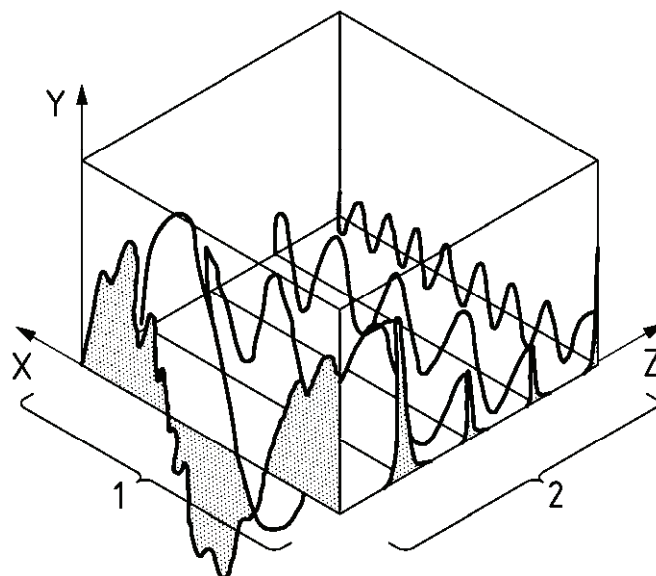
ISO 1683, *Acoustics — Preferred reference quantities for acoustic levels*

3 Behandlung des Messsignals

3.1 Allgemeines

Praktisch werden alle Schwingungsmessungen mit Aufnehmern durchgeführt, die ein analoges elektrisches Signal erzeugen, das dem Momentanwert der Schwingbeschleunigung, der Schwinggeschwindigkeit oder des Schwingwegs proportional ist. Dieses Signal kann von einem Signalanalysator aufgezeichnet werden, für eine spätere Verarbeitung gespeichert oder zum Beispiel auf dem Bildschirm eines Oszilloskops dargestellt werden. Um die tatsächliche Schwingungsamplitude zu erhalten, ist die Ausgangsspannung mit einem Kalibrierfaktor zu multiplizieren, der die Empfindlichkeit des Aufnehmers sowie die Verstärkungsfaktoren von Verstärker und Registriereinrichtung berücksichtigt. Die Schwingungsanalyse erfolgt meistens im Frequenzbereich, es sind aber auch Verfahren gebräuchlich, die den Zeitverlauf der Schwingung analysieren.

Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen einem Schwingungssignal im Zeitbereich und im Frequenzbereich. Es kann erkannt werden, dass vier überlagerte Signale zusammen das Gesamtsignal bilden; Letzteres kann am Bildschirm des Analysators beobachtet werden (hier dunkel dargestellt). Durch eine Fourier-Analyse wird das zusammengesetzte Signal in die vier diskreten Frequenzkomponenten zerlegt.

**Legende**

X Zeit

Y Amplitude

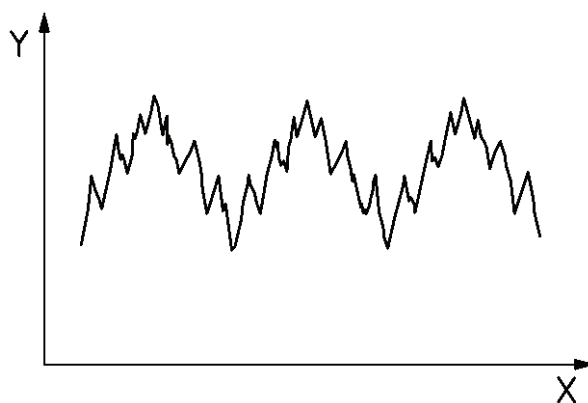
Z Frequenz

1 Zeitverlauf

2 Frequenzspektrum

Bild 1 — Zeitbereich und Frequenzbereich

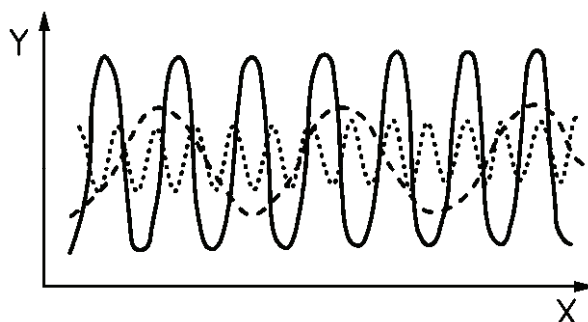
In Bild 2 ist ein einfacheres Beispiel für ein zusammengesetztes Zeitsignal dargestellt, das von einem Aufnehmer geliefert und am Bildschirm dargestellt wird. In diesem Fall existieren nur drei überlagerte Teilsignale. Sie sind in Bild 3 dargestellt, ihre diskreten Frequenzkomponenten sind in Bild 4 dargestellt.

**Legende**

X Zeit

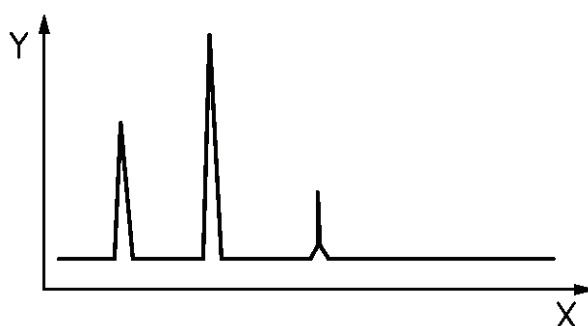
Y Amplitude

Bild 2 — Aus spektralen Komponenten zusammengesetztes Signal

**Legende**

X Zeit

Y Amplitude

Bild 3 — Überlagerte Teilsignale**Legende**

X Frequenz

Y Amplitude

Bild 4 — Diskrete Komponenten im Frequenzspektrum

Bei vielen Untersuchungen ist das Verhältnis der Schwingungen an unterschiedlichen Punkten der Struktur oder in unterschiedlichen Richtungen zueinander ebenso wichtig wie die Schwingungen selbst. Aus diesem Grund gibt es Mehrkanal-Schwingungsanalysatoren, in denen Verfahren zur Zweikanal-Signalanalyse implementiert sind. Bei der Analyse zweier Signale mit dieser Technik sind neben den Amplituden- auch die Phaseninformationen der Schwingungssignale wichtig.

3.2 Analoge und digitale Systeme

3.2.1 Allgemeines

Das von einem Aufnehmer kommende analoge Signal kann mit analogen oder digitalen Systemen verarbeitet werden. Analoge Systeme werden seit langem benutzt; sie umfassen Filter, Verstärker, Registriergeräte, Integratoren und andere Komponenten, die zwar das Signal verändern, nicht aber seinen analogen Charakter. Neuerdings werden die Vorteile der Digitalisierung von Signalen immer offenkundiger. Dabei tastet ein Analog-Digital-Umsetzer (ADU) das analoge Signal in gewissen Zeitabständen ab und verwandelt es in eine Zeitreihe numerischer Werte. Anschließend können mathematische Routinen in einem Computer genutzt werden, um die Zeitreihen zu filtern, zu integrieren, Spektren zu berechnen (siehe 4.3.2), Histogramme zu entwickeln oder was sonst noch gefordert wird. Natürlich kann das digitalisierte Signal auch als Funktion der Zeit dargestellt werden. Das analoge Signal enthält die gleichen Informationen wie das digitale Signal, sofern die Abtastrate geeignet gewählt wurde.

Sowohl bei der Nutzung der analogen als auch der digitalen Methode ist es wichtig, die Empfindlichkeit des zu messenden Signals zu kennen. Die Empfindlichkeit ist das Verhältnis der momentanen Ausgangsspannung des Messsignals zur momentanen Amplitude der Messgröße. Damit ein Signal zuverlässig ist, sollte das Nutzsignal deutlich größer als das Fremdgeräusch (Umgebungsrauschen) sein. Allerdings müssen dabei Signalverfälschungen durch zu große Verstärkung (z. B. Beschneidungen der Signalspitzen bei Übersteuerung) vermieden werden.

3.2.2 Digitalisierungstechniken

Die wichtigsten Parameter beim Digitalisierungsprozess sind die Abtastrate (Sampling-Frequenz) und die Auflösung. Es ist wichtig sicherzustellen, dass im zu digitalisierenden Signal keine Frequenzkomponenten oberhalb der halben Abtastrate enthalten sind, sonst wird das Zeitsignal verfälscht, oder das Ergebnis der Fast-Fouriertransformation (FFT) zeigt Aliasing-Komponenten, d. h. Frequenzkomponenten, die nicht tatsächlich existieren (siehe 4.3.7 bezüglich weiterer Informationen über Aliasing). Die Abtastrate wird von der Art der auszuführenden Signalanalyse und dem erwarteten Frequenzinhalt des Signals bestimmt. Wenn eine Darstellung der Schwingung über der Zeit vorgesehen ist, wird empfohlen, dass die Abtastrate etwa 10-mal höher als die höchste interessierende Frequenz im Signal ist. Wenn allerdings ein Frequenzspektrum berechnet werden soll, erfordert die FFT-Berechnung eine Abtastrate, die mehr als doppelt so hoch wie die höchste interessierende Frequenz im Messsignal ist. Anti-Aliasing-Filter werden benutzt, um hochfrequentes Rauschen oder andere Frequenzkomponenten aus dem Signal zu entfernen, deren Frequenz höher als die Hälfte der Abtastrate ist. Bei der Digitalisierung muss die Anzahl der Bits, mit denen eine Abtastung digital dargestellt wird, ausreichend sein, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen.

3.3 Signal-Anpassungseinheit

3.3.1 Allgemeines

Das vom Aufnehmer kommende Messsignal muss vor der Registrierung meist die eine oder andere Signalaufbereitung erfahren, durch die ein für die Registrierung angepasster Signalpegel erreicht sowie Rauschanteile oder andere unerwünschte Komponenten entfernt werden. Signal-Anpassungseinheiten umfassen die Stromversorgung des Aufnehmers, Vorverstärker, Verstärker, Integratoren und zahlreiche Filter. Die Filterung wird in 3.4 behandelt.

3.3.2 Integration und Differentiation

Schwingungssignale können als Schwingweg, als Schwinggeschwindigkeit oder als Schwingbeschleunigung vorliegen. Meist wird eine dieser Messgrößen aufgrund des interessierenden Frequenzbereichs bevorzugt (tieffrequente Signale treten beim Schwingweg deutlicher in Erscheinung, hochfrequente Schwingungen dagegen bei der Schwingbeschleunigung). Ein anderes Auswahlkriterium ergibt sich aus den Beurteilungskriterien des Anwendungsfalls. Ein Schwingungssignal kann durch Integration oder Differentiation in eine andere Messgröße umgewandelt werden. Das Zeitintegral über die Schwingbeschleunigung ergibt die Schwinggeschwindigkeit, die Integration der Schwinggeschwindigkeit ergibt den Schwingweg. Die zweifache Integration der Schwingbeschleunigung ergibt direkt den Schwingweg. Durch Differentiation wird der umgekehrte Umformungsprozess erreicht.

Für eine harmonische Schwingung gelten die folgenden mathematischen Beziehungen:

$$\text{Schwingweg} \quad x = \int v \, dt = \iint (a \, dt) \, dt = -1/\omega^2 \times a \quad (1)$$

$$\text{Schwinggeschwindigkeit} \quad v = \frac{dx}{dt} = \int a \, dt \quad (2)$$

$$\text{Schwingbeschleunigung} \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

Dabei ist ω die Kreisfrequenz der harmonischen Schwingung: $\omega = 2\pi f$.

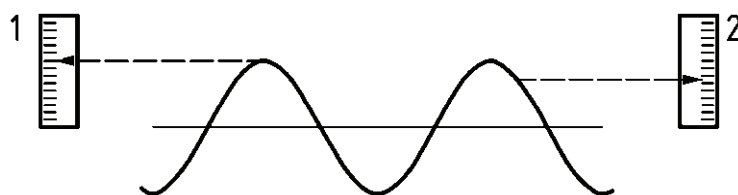
ANMERKUNG Siehe auch 4.3.12.

Ein allgemein gebräuchlicher Schwingungsaufnehmer ist der Beschleunigungsaufnehmer. Deshalb ist die Integration wesentlich häufiger gebräuchlich als die Differentiation. Das ist erfreulich, denn die Differentiation eines Signals ist schwieriger als die Integration. Bei der Integration tieffrequenter Signale muss Sorgfalt geübt werden: mittels eines Hochpassfilters sollten vor der Integration die Frequenzkomponenten eliminiert werden, die unterhalb des interessierenden Frequenzbereichs liegen.

3.3.3 Schwingungs-Effektivwert

Der Effektivwert (r.m.s.) eines Schwingungssignals wird allgemein in Normen zur Schwingungsbeurteilung gebraucht. Die Beurteilungskriterien gelten häufig für den Effektivwert in einem bestimmten Frequenzbereich. Der Effektivwert ist die am häufigsten gebrauchte Schwingungskenngroße für einen gegebenen Zeitabschnitt. Andere Kenngrößen des Schwingungssignals können uneindeutig sein, wenn es mehrere Frequenzkomponenten enthält oder moduliert ist usw. Der Effektivwert jedoch ist eine mathematisch formulierte Kenngröße, die für jedes Signal gebildet werden kann. Auch sind die meisten Messgeräte so konstruiert, dass sie diese Kenngröße bilden können (siehe Bild 5). Der Effektivwert kann aber auch nach der Spektralanalyse des Signals durch Integration des Spektrums zwischen der tiefsten und höchsten interessierenden Frequenz gebildet werden.

Ein Schwingungssignal kann in der erforderlichen Weise gefiltert und an einem Effektivwertmesser angezeigt werden, sofern das Zeitsignal in einem kurzen Zeitintervall nicht nennenswert schwankt. Wenn allerdings das Ausgangssignal stark schwankt, muss der Mittelwert über eine längere Zeitspanne gebildet werden. Das kann z. B. mit einem Effektivwertbildner geschehen, der eine längere Zeitkonstante besitzt.



a) harmonisches Signal, dessen Effektivwert dem 0,707fachen des Spitzenwerts entspricht



b) nicht-harmonisches Signal

Legende

- 1 Spitzenwert
- 2 Effektivwert

Bild 5 — Effektivwert

3.3.4 Dynamikbereich

Der Dynamikbereich oder Messbereich ist das Verhältnis zwischen der größten und der kleinsten Signalamplitude, die ein bestimmter Analysator gleichzeitig auswerten kann. Die Signalamplituden sind proportional der Ausgangsspannung des Aufnehmers, meist in Millivolt.

Der Dynamikbereich eines analogen Systems wird gewöhnlich durch das elektrische Rauschen begrenzt. Es rührt meist nicht vom Aufnehmer allein her, sondern Filter, Verstärker, Registriergerät usw. tragen zum Rauschpegel bei, sodass das Gesamtrauschen überraschend hoch sein kann.

Bei digitalen Systemen hängt der Dynamikbereich von der Genauigkeit der Digitalisierung ab. Dabei muss die Abtastrate hinsichtlich der auszuwertenden Frequenzen richtig gewählt sein. Das Verhältnis zwischen der Anzahl N der Bits, die bei der Abtastung des analogen Signals zur Verfügung stehen, und dem Dynamikbereich D berechnet sich (wenn ein Bit für das Vorzeichen gebraucht wird) wie folgt:

$$6 (N - 1) = D \text{ dB} \quad (4)$$

Demzufolge hat ein Signalanalysator mit einer Datenbreite von 16 Bit einen Dynamikbereich von 90 dB, allerdings reduziert jede Ungenauigkeit den verfügbaren Dynamikbereich.

3.3.5 Kalibrierung

Die Kalibrierung von Schwingungsaufnehmern ist in den angegebenen Normen (z. B. ISO 16063-21) umfassend behandelt. Sie wird üblicherweise im Labor vor dem Messeinsatz des Aufnehmers durchgeführt. Es wird aber empfohlen, die Kalibrierung bei jedem Einsatz vor Ort zu überprüfen. Die Vor-Ort-Überprüfung der Kalibrierung umfasst üblicherweise nicht die Kalibrierung des Aufnehmers selbst, berücksichtigt aber den gesamten Rest des Mess- und Registriersystems, d. h. Verstärker, Filter, Integratoren und Registriergeräte. Meist erfolgt die Überprüfung in der Weise, dass dem Messsystem ein bekanntes Signal zugeführt und das entstehende Ausgangssignal abgelesen wird. Abhängig vom Typ der Messeinrichtung kann das Signal z. B. ein Gleichspannungssprung, ein harmonisches Signal oder ein Rauschsignal sein.

Manche Aufnehmer, z. B. Wegaufnehmer und Wirbelstromaufnehmer, sind vorkalibriert. Dennoch sollte in solchen Fällen die Kalibrierung in Zusammenhang mit der Oberfläche des Messobjekts vor Ort überprüft werden, da Wirbelstromaufnehmer empfindlich auf die Metalllegierung und die Oberflächengüte reagieren. Eine Vor-Ort-Kalibrierung von Wirbelstromaufnehmern erfolgt durch Annähern des Aufnehmers mittels einer Mikrometerspindel und Aufzeichnung des Aufnehmer-Ausgangssignals für jede Stellung.

Zur Vor-Ort-Überprüfung der Kalibrierung seismischer Aufnehmer ist ein Schwingtisch erforderlich.

Auch Dehnungsmessstreifen werden oft nach ihrer Anbringung vor Ort kalibriert. Am besten ist eine Kalibrierung durch Aufbringen einer bekannten Belastung auf das Messobjekt. Wenn das nicht möglich ist, kann die Kalibrierung mit einem Parallelwiderstand erfolgen, d. h., ein Kalibrier-Widerstand wird parallel zum Dehnungsmessstreifen geschaltet. Die dadurch eintretende scheinbare Veränderung des Widerstandes des Dehnungsmessstreifens entspricht einer bestimmten Dehnung, die mittels des Empfindlichkeitsfaktors (k -Faktor) des Dehnungsmessstreifens bestimmt werden kann.

3.4 Filterung

Es gibt drei Grundarten von Filtern, die für die Signalaufbereitung und -analyse zur Verfügung stehen:

- Tiefpass,
- Hochpass,
- Bandpass.

Tiefpassfilter lassen — wie bereits ihr Name verrät — nur die tieffrequenten Komponenten des Signals durch, hochfrequente Komponenten oberhalb der Filter-Grenzfrequenz (Eckfrequenz) werden dagegen gesperrt. Anwendungsbeispiele sind z. B. das Anti-Aliasing-Filter (siehe 4.3.7) sowie Filter, die für die eigentliche Untersuchung unerwünschte höherfrequente Signalkomponenten eliminieren (z. B. beim Auswuchten die Zahneingriffsfrequenzen).

Hochpassfilter werden hauptsächlich eingesetzt, um tieffrequente Aufnehmerstörungen (z. B. thermisches Rauschen) oder andere unerwünschte Komponenten vor der Signalanalyse aus dem Messsignal zu eliminieren. Das kann wichtig sein, weil solche Komponenten, obwohl sie nicht von Interesse sind, den nutzbaren Dynamikbereich der Messeinrichtung drastisch begrenzen können.

Bandpassfilter werden bei der Analyse benutzt, um einzelne Frequenzbänder aus dem Signal zu extrahieren. Sehr gebräuchlich sind Oktavfilter oder Filter mit der Bandbreite eines Bruchteils ($1/n$) einer Oktave. Sie werden gewöhnlich eingesetzt, um einen Bezug zwischen Schwingungsmessungen und Schallpegelmessungen herzustellen.

Die Filterung ist besonders bei der Analyse von Signalen mit einem großen Dynamikbereich wichtig. Gibt es z. B. im Spektrum sowohl Frequenzanteile mit großen Amplituden als auch solche mit geringen Amplituden, können sie aufgrund des begrenzten Dynamikbereichs des Analysators gewöhnlich nicht mit gleicher Genauigkeit ausgewertet werden. In solchen Fällen ist es notwendig, die Komponenten mit hohen Amplituden auszufiltern, um diejenigen mit geringerer Amplitude genauer analysieren zu können.

Filterung ist auch für die Trennung von Nutzsignal und Störsignal von Bedeutung (etwa Rauschen bei hohen Frequenzen oder Erschütterungen bei sehr tiefen Frequenzen).

Wenn Filter zur Extraktion einzelner Frequenzkomponenten eingesetzt werden, um ihren Signalverlauf zu analysieren, muss Sorgfalt darauf verwendet werden, dass das Filter wirklich alle Komponenten mit anderer Frequenz als die interessierenden Schwingungskomponenten unterdrückt. Einfache Filter, sowohl Analogfilter als auch Digitalfilter, haben keine sehr scharfe Trenncharakteristik, weil die Flankensteilheit (Filterdämpfung) außerhalb des Durchlassbereichs nur gering ist.

BEISPIEL Ein Filter mit einer Flankensteilheit von 24 dB/Oktave lässt bei der doppelten Eckfrequenz 15 % der Signalkomponente und bei dem 1,5fachen der Eckfrequenz sogar 45 % der Signalkomponente durch. Um die Signaltrennung zu verbessern, können mehrere einfache Filter hintereinander geschaltet (Kaskadenschaltung) oder Filter höherer Ordnung eingesetzt werden.

4 Datenverarbeitung und Diagnostik

4.1 Allgemeines

Die Datenverarbeitung umfasst die Aufnahme der Rohdaten, die Ausfilterung unerwünschter Rausch- oder sonstiger Störsignale und die Formatierung des Messsignals entsprechend den Anforderungen der nachfolgenden Diagnostik. Damit ist die Datenverarbeitung ein wichtiger Schritt zur Erzielung einer erfolgreichen Diagnostik. Das Gerät, mit welchem das Schwingungssignal vom Aufnehmer übernommen wird, sollte eine geeignete Auflösung der Zeitachse und der Signalamplitude ermöglichen. Werden die Daten digital aufgenommen, sollte die Amplitudenauflösung für die betrachtete Anwendung hoch genug sein. Eine höhere Anzahl von Bits ermöglicht eine höhere Genauigkeit und Empfindlichkeit, es ist aber eine teurere apparative Ausstattung und eine größere Signalverarbeitungsleistung erforderlich.

Ist das Signal aufgenommen, ist der nächste Schritt seine Verarbeitung und danach die Darstellung der Ausgangskenngößen in geeigneten Datenformaten, um die Diagnostik für den Anwender zu erleichtern. Beispiele für solche Formate sind Nyquist- oder Polardiagramm, Campbell-Diagramm, Kaskaden- oder Wasserfalldiagramm sowie Amplituden-Abklingkurve. Das Ziel dieses Abschnitts ist es deshalb, dem Anwender diese verschiedenen Darstellungsformen zum Zwecke einer besseren Bestimmung des Maschinenzustands zur Verfügung zu stellen.

4.2 Analyse im Zeitbereich

4.2.1 Signalverlauf

In der Vergangenheit war die Analyse des Signalverlaufs die bevorzugte Methode zur Schwingungsanalyse. Die Darstellung der augenblicklichen Schwingung über der Zeit als Schrieb oder Oszillogramm wurde meist grafisch analysiert, wobei Spitzen in den breitbandig gemessenen Schwingungen betrachtet werden. Obwohl diese Technik noch immer angewandt wird, lohnt es sich, den Signalverlauf mit verschiedenen detaillierteren Techniken zu analysieren. So kann z. B. ein zerkratzter Lagerzapfen durch Betrachtung der Form des Ausgangssignals eines Schwingwegaufnehmers erkannt werden. Ein Signalverlauf, bei dem die oberen und unteren Spitzen abgeschnitten sind, deutet auf Anstreifen, Klappern usw. hin.