

Condition Monitoring Praxis

Handbuch zur Schwingungs-Zustandsüberwachung
von Maschinen und Anlagen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort.....	7
Einleitung.....	9
1 Zustandsüberwachung	13
2 Grundlagen der Schwingungstechnik.....	25
3 Signalverarbeitung.....	47
4 Messsysteme und Datenerfassung	75
5 Aufbau einer Zustandsüberwachung	107
6 Allgemeine Analyse und Diagnose.....	125
7 Bauteilspezifische Analyse und Diagnose	151
8 Maschinen- und anlagenspezifische Analyse und Diagnose	195
9 Korrektive Maßnahmen.....	233
10 Ermitteln von Eigenfrequenzbereichen.....	255
11 Abnahmeprüfungen.....	264
12 Normen	269
ABC Register	282

Vorwort

Basis dieses umfangreichen Werks sind die langjährige berufliche Erfahrung und das Fachwissen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus dem operativen Einsatz in einer Vielzahl industrieller Sektoren.

Wir haben bei der Erstellung dieses Buchs großen Wert darauf gelegt, auch komplexe Vorgänge in verständlicher Sprache auszudrücken, ganz nach dem Motto „Aus der Praxis für die Praxis“. Viele veranschaulichende Grafiken und Bilder begünstigen ein tiefes, nachhaltiges Verständnis.

In der deutschsprachigen Literatur ist die Condition Monitoring Praxis damit ein einzigartiges Handbuch zur Schwingungs-Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen.

Mit der Norm DIN ISO 18436-2 vertritt die deutsche Industrie ihre Interessen in Bezug auf die vergleichbare Ausbildung und Qualifizierung von Personal, das im Umfeld der Schwingungszustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen tätig ist.

In diesem Handbuch werden die inhaltlichen Vorgaben aus dieser Norm in der Kategorie I und II umfassend, ausführlich und produktneutral berücksichtigt. Damit eignet sich das Handbuch in besonderem Maße zur Vorbereitung einer Zertifizierung vor einem akkreditierten Zertifizierungsinstitut. Gleichzeitig ist es ein Nachschlagewerk und Helfer in der täglichen Instandhaltungspraxis.

Somit erfüllt dieses Buch sowohl die praktischen Anforderungen der industriellen Instandhaltung als auch die Anforderungen an die theoretischen Erklärungen eines Lehrbuchs. Es ist damit auch für all jene geeignet, die sich zusätzliches Fachwissen im Bereich der Schwingungsüberwachung aneignen möchten und dabei stets die tägliche Arbeit im Blick behalten müssen.

Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Projektteams aus den Bereichen Operativer Service und Training, die mit hohem persönlichen Einsatz zusätzlich zum Tagesgeschäft mit großer Sorgfalt an der Erstellung der Texte und Grafiken gearbeitet haben.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg und Inspiration, sei es bei der täglichen Arbeit oder der Prüfungsvorbereitung.

Schaeffler Monitoring Services GmbH

Einleitung

Die Vermeidung von ungeplanten Stillständen und damit die Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit stellen im Bereich der Instandhaltung eine immer wichtiger werdende Herausforderung dar. Die frühzeitige Erkennung eines Maschinenschadens erlaubt es, rechtzeitig Maßnahmen zu ergreifen, um Stillstandszeiten zu reduzieren und die Reparaturkosten so gering wie möglich zu halten. Gleichzeitig sollen Bauteile nicht vorbeugend, sondern erst bei einem Defekt ausgetauscht werden, wodurch ihre Lebensdauer optimal genutzt und eine weitere Kosteneinsparung realisiert wird. Dies bedeutet für den Betreiber ein hohes Maß an Investitionssicherheit und gleichzeitig einen aktiven Maschinenschutz.

Mit Instandhaltungskonzepten, die sich auf die Überwachung des Maschinenzustands stützen, sind Anlagenbetreiber in der Lage, die Instandhaltung in Bezug auf das Personal und die Ersatzteile zu planen, zu priorisieren und damit zu optimieren. Außerdem lassen sich so Änderungen der Maschinenleistung sowie mögliche Einflüsse auf die Qualität und den Produktionsprozess erkennen.

Für eine effektive zustandsorientierte Instandhaltung ist Personal erforderlich, das durch eine entsprechende Ausbildung und ausreichende Erfahrung qualifiziert ist, Maßnahmen zu planen, Messungen und Auswertungen durchzuführen und Handlungsempfehlungen auszusprechen. Die Qualifikation des Personals ist in DIN ISO 18436 festgelegt und kann nach dieser Norm zertifiziert werden.

Das vorliegende Handbuch hält sich an die zugrunde liegende Norm DIN ISO 18436-2:2014-11 und kann als Hilfsmittel bei der Qualifizierung von Personal in der Schwingungsanalyse zur Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen dienen. Insbesondere richtet es sich an diejenigen, die eine Zertifizierung nach Kategorie I oder II anstreben. Die Abschnitte 4.2 bis 4.5 der Norm DIN ISO 18436-2 geben einen Überblick über die typischen Kompetenzen und Fähigkeiten, die in jeder Kategorie erforderlich sind.

Es existieren zahlreiche Normen, die bei der Messung und Beurteilung von Maschinenschwingungen herangezogen werden können. Die bekannteste ist die DIN ISO 10816, die sich jedoch derzeit in Überarbeitung befindet. Sie wird mit der DIN ISO 7919 in der DIN ISO 20816 zusammengeführt und durch diese ersetzt. Um bisheriges Wissen zu den Normen aufzugreifen und um Kontinuität und Transparenz zu gewährleisten, wird im vorliegenden Handbuch durchgehend auf die entsprechenden Teile der DIN ISO 10816 beziehungsweise DIN ISO 7919 verwiesen.

Zustandsüberwachung



1 Zustandsüberwachung

	Seite
1.1 <i>Instandhaltungsstrategien</i>	15
1.1.1 <i>Ausfallorientierte Instandhaltung</i>	15
1.1.2 <i>Vorbeugende Instandhaltung</i>	16
1.1.3 <i>Zustandsorientierte Instandhaltung</i>	17
1.1.4 <i>Vorausschauende Instandhaltung</i>	18
1.2 <i>Methoden der Zustandsüberwachung</i>	18
1.2.1 <i>Schwingungsanalyse</i>	18
1.2.2 <i>Schmierstoffanalyse</i>	20
1.2.3 <i>Endoskopie</i>	21
1.2.4 <i>Thermografie</i>	21

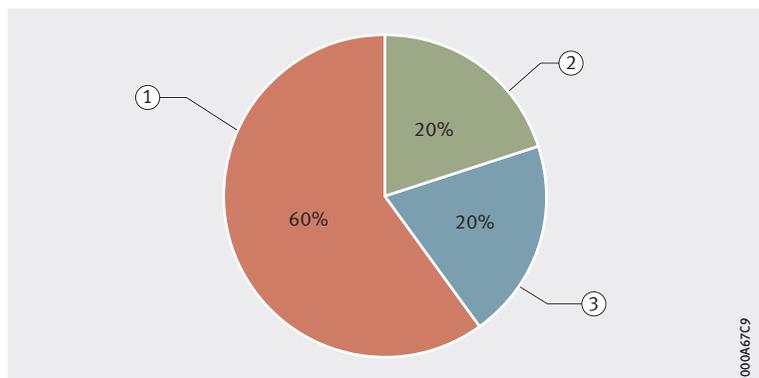
1 Zustandsüberwachung

Der Bereich Zustandsüberwachung (englisch: Condition Monitoring) hat sich in den vergangenen Jahrzehnten in Konzeptionierung und Technik deutlich weiterentwickelt und damit auch die Instandhaltung beeinflusst. Die ebenfalls stetig voranschreitende technische Weiterentwicklung von Maschinen, Anlagen und Kommunikationswegen erfordert die kontinuierliche Anpassung der Messtechnik und der Instandhaltungsstrategien. Während die Instandhaltung zunächst den Fokus auf die Betriebsfähigkeit beziehungsweise die Wiederherstellung eines technischen Systems legt, verfolgt die Zustandsüberwachung in erster Linie zwei Ziele: Gewährleistung von Sicherheit und Erhöhung der Effizienz. Das bedeutet unter anderem, die technische Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen bei gleichzeitiger Steigerung der Qualität und Produktivität zu optimieren. Des Weiteren gilt es, durch frühzeitiges Erkennen von Zustandsänderungen Folgeschäden zu vermeiden.

Die tatsächliche Gebrauchsdauer von Maschinen und Maschinenelementen ist zumeist deutlich kürzer als die nominelle Lebensdauer. Unwucht, Fehlausrichtung und Lagerschäden werden als die drei hauptsächlichen Ursachen genannt, die zu unvorhergesehenen Anlagenausfällen und Produktionsstillständen führen können. Weitere häufige Ursachen sind Struktur- und Befestigungsprobleme sowie Resonanz. **Bild 1-1** zeigt die relative Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Ausfallursachen.

Bild 1-1
Häufigkeit
der Ausfallursachen

- ① Unwucht und Ausrichtungsfehler
- ② Wälzlagerschäden
- ③ Andere



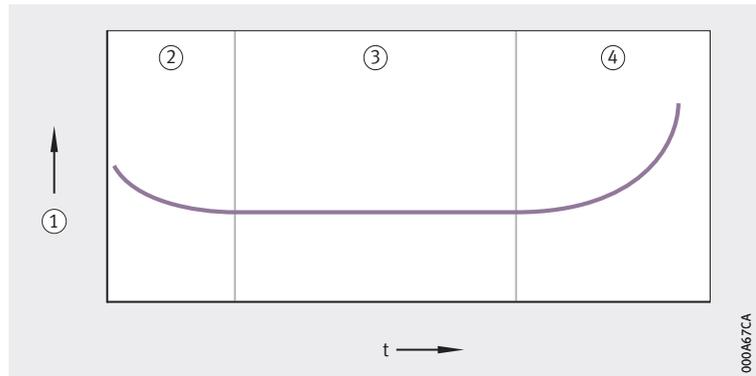
Mangelschmierung und falsch ausgelegte oder falsch belastete Bauteile können ebenfalls Schäden hervorrufen. Beispielsweise lassen sich für Wälzlager als Ausfallursachen ein Mangel an Schmierstoff, ungeeignetes oder gealtertes Schmiermittel, Verunreinigungen des Schmierstoffs, Montagefehler und Überlastung beziehungsweise Ermüdung nachweisen.

Bei einem Ausfall entstehen zunächst direkte Instandsetzungskosten für den Austausch des defekten Bauteils. Doch auch die durch Sekundärschäden verursachten Kosten können durchaus erheblich sein und eventuell sogar höher liegen als die Reparaturkosten für das ursprünglich defekte Maschinenbauteil.

Ausfälle von Maschinen können jederzeit auftreten. Besonders groß ist ihre Wahrscheinlichkeit jedoch am Anfang und am Ende der erwarteten Lebensdauer einer Maschine. Frühausfälle werden vor allem durch Materialfehler sowie durch Fehler bei der Fertigung und Montage verursacht. Gegen Ende der Lebensdauer sind die meisten Ausfälle auf Verschleiß und Ermüdung zurückzuführen. Dazwischen treten Ausfälle eher zufällig auf und werden durch Fehler in der Bedienung oder der Wartung der Maschinen begünstigt. Dieser zeitliche Verlauf der Ausfallrate wird durch die sogenannte Badenwannekurve dargestellt, siehe **Bild 1-2**, Seite 15.

Bild 1-2
Badewannenkurve

- ① Ausfallrate
 - ② Einlaufphase
 - ③ Nutzbare Betriebsphase
 - ④ Endphase der Lebensdauer
- t = Zeit



Sie zeigt, wie am Anfang des Lebenszyklus die Ausfallrate zunächst relativ hoch ist, dann aber abnimmt. Im mittleren Bereich verläuft die Ausfallrate konstant, während sie zum Ende hin stark ansteigt.

Aus der Kenntnis dieser Badewannenkurve und dem Ziel, die Ausfallwahrscheinlichkeit möglichst gering zu halten, können Maßnahmen abgeleitet werden, die die Vorgehensweise in der Instandhaltung maßgeblich beeinflussen.

1.1 Instandhaltungsstrategien

Grundlegende Maßnahmen in der Instandhaltung sind die Wartung, die Inspektion, die Instandsetzung und die Verbesserung (DIN 31051). Die Prioritäten bei der Instandhaltung von technischen Systemen, Anlagen und Maschinen unterscheiden sich in den verschiedenen Branchen und Unternehmen. Dazu passend müssen die Instandhaltungsstrategien ausgewählt werden. Dies gilt auch im Hinblick auf die verschiedenen Maschinen- und Anlagentypen sowie ihre jeweiligen Nutzungsarten. So erfordern prozesskritische Anlagen in der Regel andere Instandhaltungsaktivitäten als Hilfsaggregate, auf die bei einem Ausfall zeitweilig verzichtet werden kann oder die schnell und relativ kostengünstig ersetzbar sind. In einem besonderen Fokus stehen Produktionsanlagen, die im Dauerbetrieb sind und bei denen der Anfahrprozess sehr aufwendig ist. In einigen Serienfertigungsprozessen ist es von zentraler Bedeutung, die Anlagen ständig in Betrieb zu halten. Ein unerwarteter Betriebsstopp führt hier zu sehr hohen Ausfallkosten und zu teurer Verschwendung von Produktionsmaterial.

Die erforderlichen technischen und administrativen Maßnahmen und Aktivitäten ergeben sich aus der jeweils angewendeten Instandhaltungsstrategie. Im Beiblatt 1 der Norm DIN ISO 17359 sind vier Strategien angegeben:

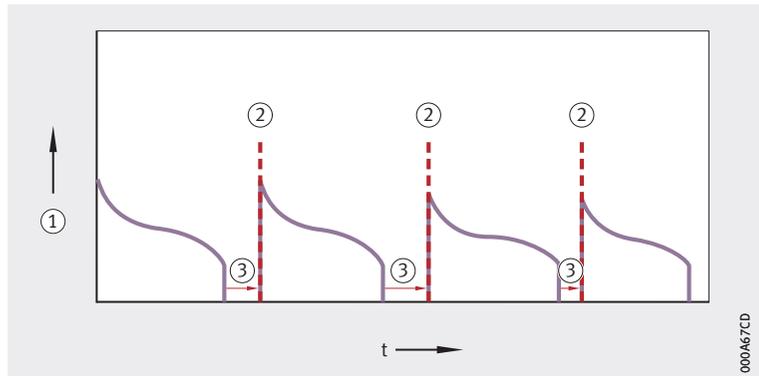
- Ausfallorientierte Instandhaltung
- Vorbeugende Instandhaltung
- Zustandsorientierte Instandhaltung
- Vorausschauende Instandhaltung

1.1.1 Ausfallorientierte Instandhaltung

Die ausfallorientierte Instandhaltung wird auch häufig Bruchwartung genannt und gilt als passive Strategie. Hierbei erfolgt eine Instandhaltungsmaßnahme erst nach dem Eintreten eines Ausfalls einer Anlage beziehungsweise nach einer Schädigung eines Maschinenelements, siehe **Bild 1-3**, Seite 16. Während des Anlagenbetriebs werden also keine Informationen über den Anlagenzustand erhoben oder ausgewertet. Bauteile oder Betriebsmittel werden nur situationsbezogen ausgetauscht, um die Betriebsfähigkeit wiederherzustellen.

Bild 1-3
Ausfallorientierte
Instandhaltung

- ① Abnutzungsreserve
 - ② Instandsetzungsmaßnahme
 - ③ Wiederherstellungszeit
- t = Zeit



Da der Zeitpunkt eines Ausfalls nicht vorausgesagt werden kann, sind das Ausmaß der Schäden und die benötigte Wiederherstellungszeit im Vorfeld unbestimmt. Dies resultiert in der Regel in einem erhöhten Zeit- und Arbeitsaufwand für die Instandsetzung und zieht unter Umständen auch Folgeschäden benachbarter oder angeschlossener Anlagen mit sich.

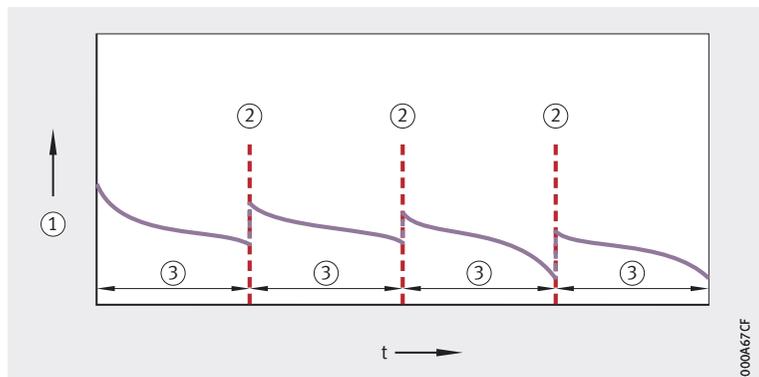
Der große Vorteil dieser Methode ist jedoch die Tatsache, dass während des reibungslosen Gebrauchs keine Kosten anfallen und die volle Abnutzungsreserve der Maschine ausgenutzt wird. Dies ist insbesondere interessant für Maschinen, deren Betrieb keinen direkten Einfluss auf produktionskritische Prozesse hat oder deren kompletter Austausch wirtschaftlicher ist als eine der nachfolgend aufgeführten aktiven Instandhaltungsstrategien.

1.1.2 Vorbeugende Instandhaltung

Mit Hilfe einer aktiven Instandhaltungsplanung erlangt der Betreiber ein gewisses Maß an Kontrolle über den Zustand seiner Betriebsmittel. Bei der vorbeugenden oder präventiven Instandhaltung wird davon ausgegangen, dass eine Maschine oder Anlage in definierten Zeitabständen bestimmte Instandhaltungsaufwendungen benötigt, siehe **Bild 1-4**. Die Festlegung der Zeitintervalle beruht auf der mittleren Lebensdauer der Anlage und Erfahrungswerten.

Bild 1-4
Vorbeugende
Instandhaltung

- ① Abnutzungsreserve
 - ② Instandhaltungsmaßnahme
 - ③ Festes Wartungsintervall
- t = Zeit



Die festen Zeitintervalle der vorbeugenden Instandhaltung ermöglichen eine gezielte Integration in bestehende Produktionsabläufe oder Planungen von Stillständen. Sie korrelieren jedoch nicht zwangsläufig mit dem tatsächlichen Anlagenzustand. Hier kann es also zu einem vorzeitigen Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen kommen, der unnötig Ressourcen wie Material und Arbeitszeit beansprucht.

Das Auftreten eines nicht planbaren Zufallsschadens, der zum Beispiel durch Materialfehler oder unsachgemäße Bedienung auftritt, kann durch die vorbeugende Instandhaltung weder erkannt noch gezielt vermieden werden. Außerdem ist zu bedenken, dass jeder Instandhaltungseingriff in eine Maschine auch wiederum das Risiko eines Montagefehlers bergen kann. Regelmäßige Wartungsmaßnahmen können durchaus den vorzeitigen Verschleiß eines Bauteils hervorrufen, beispielsweise durch die Abnutzung des Wellensitzes oder des Lagergehäuses.

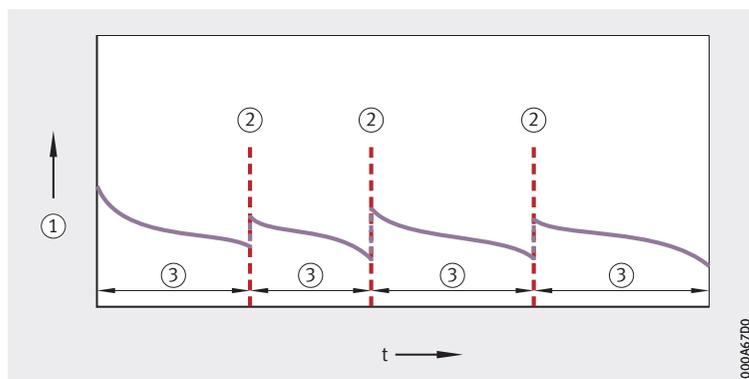
1.1.3 Zustandsorientierte Instandhaltung

Bei der zustandsorientierten Instandhaltung werden die Maschinen und Anlagen nicht ausfall- oder zeitorientiert gewartet, sondern gemäß dem ermittelten Bauteilzustand. Bei dieser Strategie wird die Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) eingesetzt, um Wartungs- und Reparaturarbeiten abhängig vom tatsächlichen Abnutzungszustand einer Anlage beziehungsweise einer Maschine durchzuführen, siehe **Bild 1-5**. Es können verschiedene Methoden, auch in Kombination, eingesetzt werden, um den aktuellen Anlagenzustand zu ermitteln, siehe **Abschnitt 1.2**, Seite 18.

Unter Berücksichtigung diverser Parameter fließt das Ergebnis der Zustandsüberwachung in die Planung gezielter Instandhaltungsmaßnahmen ein. Die Effizienz der überwachten Maschine wird erhöht und die Ausfallkosten werden insgesamt gesenkt.

Bild 1-5
Zustandsorientierte
Instandhaltung

- ① Abnutzungsreserve
 - ② Instandhaltungsmaßnahme
 - ③ Variables Wartungsintervall
- t = Zeit



Die zustandsorientierte Instandhaltung bietet folgende Vorteile:

- Der Ausfall von Anlagen und Maschinen aufgrund von Bauteilschäden sowie dadurch entstehende Folgeschäden werden vermieden.
- Durch die frühzeitige Erkennung von Fehlerzuständen und Schäden sind der Austausch der betroffenen Bauteile und damit auch der dafür nötige Stillstand planbar.
- Durch eine angepasste Planung der Reparaturmaßnahmen und die rechtzeitige Beschaffung der benötigten Ersatzteile können Stillstandszeiten minimiert werden.
- Die Entwicklung erkannter Schäden kann in einigen Fällen durch spezifisch zugeschnittene Maßnahmen, zum Beispiel Nachschmierung, Drehzahl- oder Lastverringerung und Drehen von feststehenden Lageringen um 180°, verlangsamt werden.
- Bauteile werden erst dann ausgetauscht, wenn es aufgrund ihres Zustands notwendig ist. Das heißt, dass durch die optimale Ausnutzung der Abnutzungsreserve der Bauteile die Verfügbarkeit der Anlagen und Maschinen erhöht wird.

Methoden der Zustandsüberwachung

Folgende Nachteile führen dazu, dass die zustandsorientierte Instandhaltung eine kostenintensive Instandhaltungsform ist, die nicht für jede Maschine die wirtschaftlich beste Lösung ist:

- Für die Zustandsüberwachung ist eine technische Ausstattung in Form von Messgeräten, Sensoren und Software erforderlich.
- Die Aufnahme und Analyse von Messdaten ist zeitaufwendig und erfordert entsprechende personelle Ressourcen.
- Das erforderliche Wissen zur Aufnahme und Analyse von Messdaten muss beim Personal durch Schulungen und Erfahrung aufgebaut werden.

1.1.4 Vorausschauende Instandhaltung

Ausgehend von der zustandsorientierten Instandhaltung gewinnt die vorausschauende Instandhaltungsplanung immer mehr an Bedeutung. Durch Fehleranalyse beziehungsweise Ursachenforschung wird der aktuelle Anlagenzustand nicht nur berücksichtigt, sondern zusätzlich durch begleitende Maßnahmen optimiert. Damit soll die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Ausfalls langfristig weiter gesenkt werden.

Zu den eingesetzten Maßnahmen können beispielsweise die Analyse der Maschinenhistorie, spezielle Messungen zur Ermittlung von Eigenfrequenzen oder Phasenbeziehungen sowie Verbesserungen des Betriebszustands durch Präzisionsauswuchten oder -ausrichten gehören.

1.2 Methoden der Zustandsüberwachung

Ein störungsfreier und optimierter Betrieb von komplexen Anlagen und Maschinen ist effektiv durch die Zustandsüberwachung zu erreichen. Ihr Fokus liegt daher auf dem regelmäßigen Erfassen von Daten und dem Auswerten derjenigen Größen, die Rückschlüsse auf den Zustand der Maschine oder Anlage zulassen.

Grundlage einer solchen Zustandsüberwachung ist die Kenntnis der Anlage, der Maschinenteile, deren Aufbau und Funktion und der daraus resultierenden Fehler- und Ausfallmöglichkeiten. Ein Programm zur zustandsorientierten Überwachung priorisiert die Ziele und sollte auf die Anforderungen der spezifischen Anwendung ausgerichtet sein, siehe *Kapitel 5*. Je nach Art der Anlage oder Maschine und deren Bedeutung für den Produktionsprozess kommt die kontinuierliche (online) oder die regelmäßige Überwachung (offline) zum Einsatz.

Für die Erfassung des Zustands einer Maschine im Betrieb stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Im Wesentlichen lassen sie sich in destruktive (zerstörende) und nicht-destruktive (zerstörungsfreie) Methoden unterscheiden. Da mittels Zustandsüberwachung jedoch generell eine erhöhte Verfügbarkeit der Anlage angestrebt wird, sind zerstörende Prüfungsmethoden äußerst selten anzutreffen und werden meist nur im Nachhinein bei der Ursachenforschung angewendet.

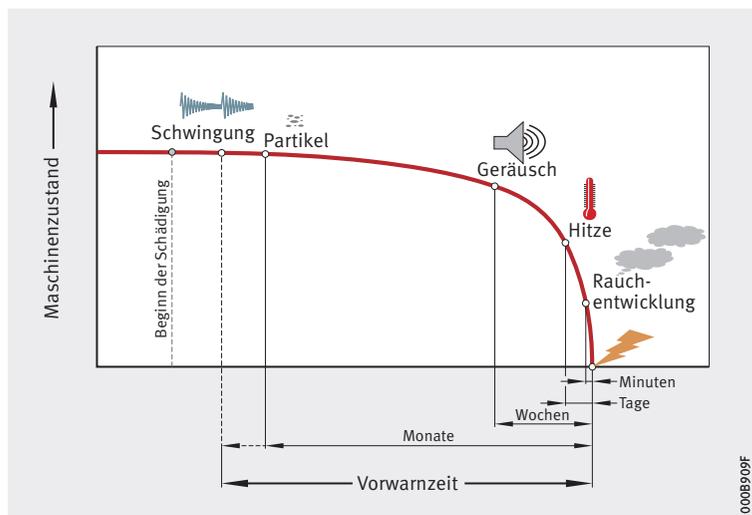
Die in den folgenden Abschnitten vorgestellten, nicht-destruktiven Methoden und Techniken zur Realisierung einer wirkungsvollen Zustandsüberwachung sollen als Orientierungshilfe dienen, um einen Überblick über einige der vielfältigen Optionen und Anwendungsbereiche zu erhalten.

1.2.1 Schwingungsanalyse

Ihren Anfang nahm die Schwingungsanalyse mit den Beobachtungen der Maschinenbediener, die Auffälligkeiten mit „menschlicher Sensorik“, also über Hören, Fühlen und Sehen, wahrnahmen und bis zu einem gewissen Grad auch bewerteten. Mit dem Fortschritt der Messtechnik konnten die auffälligen Schwingungen von Maschinen bald nicht mehr nur subjektiv, sondern umfassender und objektiv aufgenommen werden. Dadurch wurde die Qualität der daraus gewonnenen Erkenntnisse immer weiter verbessert.

Heutzutage ist die schwingungsbasierte Maschinenüberwachung ein etabliertes und zuverlässiges Werkzeug zur Erkennung und Ursachenfindung von Maschinenproblemen in einem frühen Stadium. Sie unterstützt damit die rechtzeitige Planung von notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen. Unwucht und Ausrichtfehler lassen sich mit der Schwingungsmessung und Schwingungsanalyse genauso als Fehlerzustände detektieren wie Wälzlagerschäden, Verzahnungsdefekte und andere. Je nach Applikation lassen sich Vorwarnzeiten von mehreren Monaten realisieren, siehe **Bild 1-6**.

Bild 1-6
Schadensverlauf und
Detektierbarkeit in
Abhängigkeit von der Zeit



Schwingungen werden durch auftretende Kräfte angeregt. Für jede Maschine im Betrieb wird eine gewisse Grundschwingung festzustellen sein, die ihren mechanischen Zustand widerspiegelt. Ändern sich die Kräfte, die in der Maschine wirken, zum Beispiel durch eine auftretende Unwucht, beschädigte Maschinenbauteile oder elektrische Probleme, so ändert sich auch das Schwingverhalten der Maschine. Steigt der Schwingungspegel bei weiterhin gleichbleibenden Betriebsparametern an, deutet dies auf eine Verschlechterung des Maschinenzustands hin.

Mit der Schwingungsanalyse können anhand charakteristischer Schwingungsmuster in den Messsignalen die verschiedenen Maschinenfehler und Schadensarten identifiziert werden, siehe **Kapitel 6** bis **Kapitel 8**. Aufgrund der frühzeitigen Erkennung des veränderten Zustands kann zunächst ein Weiterbetreiben der Maschine durchaus zulässig sein. Diese Methode der Zustandsüberwachung bietet ein großes Potential zur Kosteneinsparung, sofern durch sie die Lebensdauer der Anlagen und Maschinen beinahe vollständig ausgenutzt und ihre Verfügbarkeit erhöht werden können.

In den meisten Fällen wird der Fokus auf die Messung und Analyse von Körperschall gelegt. Hierbei werden die Schwingungen an der Oberfläche eines festen Körpers, zum Beispiel eines Maschinengehäuses, aufgenommen, die innerhalb des Körpers von ihrem Entstehungsort zum Messort übertragen werden. Alternativ dazu können auch Messverfahren angewandt werden, bei denen die Schwingbewegung eines ganzen Körpers, wie beispielsweise einer Welle, betrachtet wird.

1.2.2 Schmierstoffanalyse

Ein wichtiger Aspekt, der ebenfalls Informationen über die Maschine liefert, ist der Zustand des Schmiermittels. Hier stehen zwei Wege zur Verfügung: Das Schmiermittel kann durch Sensorik direkt in der Maschine überwacht oder durch Probenentnahme labortechnisch untersucht werden.

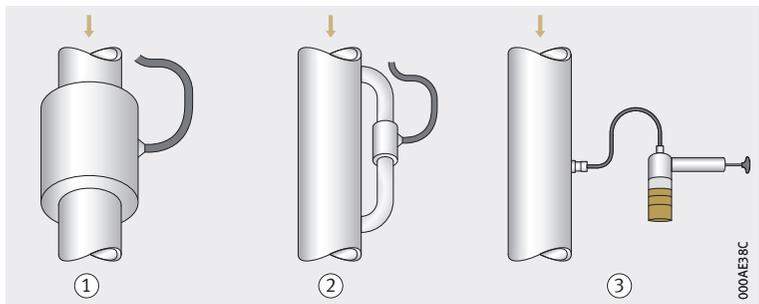
Zu den diversen Parametern, die zu einem Gesamtbild über den Zustand des Schmiermittels beitragen können, zählen zum Beispiel Viskosität, Wassergehalt, Verschmutzung und Alterung.

Eine häufig eingesetzte Methode ist die Überwachung des Schmieröls auf feste und flüssige Verunreinigungen. Hierbei wird die oben bereits erwähnte regelmäßige Probenentnahme mit anschließender labortechnischer Untersuchung des Öls als Offline-Überwachung bezeichnet, siehe **Bild 1-7**.

Die Online-Überwachung des Öls durch Sensorik in der Maschine kann entweder im Öl-Hauptfluss oder in einem abgezweigten Nebenfluss stattfinden. Dafür wird beispielsweise ein Ölsensor vor den Filter des Ölkreislaufs der Maschine installiert.

Bild 1-7
Ölanalyse

- ① Online-Überwachung im Öl-Hauptfluss
- ② Online-Überwachung im abgezweigten Nebenfluss
- ③ Offline-Überwachung



Feste Verunreinigungen in Form von Partikeln können durch Materialabrieb oder -ausbruch entstehen. Steigen die Anzahl und die Größe der Partikel an, kann das ein Indiz für eine Verschlechterung des Maschinenzustands sein. Je nach Funktionsprinzip des Ölsensors (zum Beispiel optisch oder induktiv) können die hindurchfließenden Partikel erfasst und nach Anzahl, Größe und Material klassifiziert werden. Über das Material kann auf die Herkunft der Partikel und damit auf das defekte Bauteil geschlossen werden.

Ein Beispiel für flüssige Verunreinigung ist eine Kontamination des Schmieröls durch Wasser, beispielsweise aufgrund eines Lecks oder unsachgemäßer Handhabung.

Neben Schmieröl kann auch der Zustand von Schmierfett überwacht werden. Hierbei kommt in den meisten Fällen die Offline-Überwachung, also die Analyse von entnommenen Fettproben, zur Anwendung.

Es gibt allerdings auch Sensoren, die sich zur Online-Überwachung direkt im Schmierfett befinden. Je nach Funktionsweise können unter anderem Wassergehalt, Trübung, thermischer und mechanischer Verschleiß und Fetttemperatur erfasst werden. In Verbindung mit automatischen Schmierstoffgebern ist so sogar ein zustandsorientiertes Nachfetten möglich.

1.2.3 Endoskopie

Mit einem digitalen, optischen Industrie-Endoskop werden das Innere einer Maschine und ihre Bauteile visuell begutachtet, siehe **Bild 1-8**. Als bildgebendes Verfahren ermöglicht die Endoskopie sofort eine Aussage über den Zustand einzelner Bauelemente, wie Wälzlager und Verzahnungen, ohne dass eine aufwendige Demontage der Maschine erforderlich ist. Besonders geeignet ist die Endoskopie bei Anlagen und Maschinen, die mit Service-Öffnungen ausgestattet sind.

Bild 1-8
Endoskopie

- ① Getriebe
- ② Wälzlager



Visuelle Inspektionen können entweder im Bedarfsfall oder als regelmäßige Überwachung durchgeführt werden. Der aktuelle Zustand ist eindeutig bestimmbar und kann mit einem Video oder Bild dokumentiert werden.

Im Schadensfall ist mit in kürzeren Zeitabständen durchgeführten Endoskopien die Ausbreitung des Schadens detailliert verfolgbar.

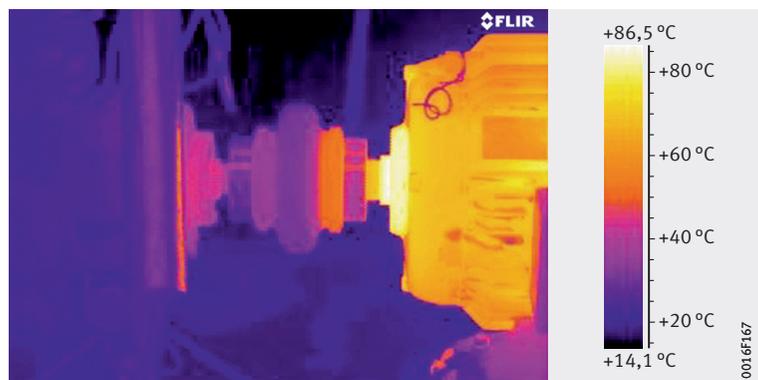
Werden die Betriebsparameter oder Instandhaltungsmaßnahmen dementsprechend angepasst, kann eine weitere Schadensausbreitung verzögert werden. Gegebenenfalls ist es sogar möglich, einen geplanten Stillstand für die Reparatur des geschädigten Maschinenteils weiter hinauszuzögern.

1.2.4 Thermografie

Viele technische Probleme äußern sich in Form von Wärmeentwicklung, beispielsweise durch einen Anstieg der Reibkräfte, am zu überwachenden Objekt. Diese Wärmeentwicklung kann mittels einer hochauflösenden Infrarotkamera berührungslos ermittelt werden, siehe **Bild 1-9**.

Dadurch können thermisch besonders kritische Bereiche einer Anlage gezielt überwacht werden. Das Besondere an dieser Technik ist, dass sie nicht nur auf den mechanischen Aspekt des Anlagenzustands zielt, sondern auch Anwendung im elektrischen Bereich findet, zum Beispiel beim Überprüfen der elektrischen Verbindungen in Schaltschränken.

Bild 1-9
Infrarot-Thermografie



Methoden der Zustandsüberwachung

Der größte Vorteil der Thermografie ist die schnelle und berührungslose Erfassung der Oberflächentemperaturen im laufenden Betrieb. Mit einem gleichzeitig erstellten Foto können die Temperaturverläufe von einem Anlagen- oder Maschinenteil vor Ort zugeordnet und als Ist-Zustand dokumentiert werden. Auffällige Komponenten können sofort lokalisiert werden. Eine fehlerhafte Ausrichtung von Motoren, Pumpen oder Lüftern kann häufig noch während der Inbetriebnahme erkannt werden. Für die thermische Überwachung von Prozessen ist die Thermografie ein geeignetes Verfahren.

Wärmequellen können auch ein Anzeichen für eine ungleichmäßige Belastung oder einen fortgeschrittenen Bauteilverschleiß sein. Beispielsweise zeigt ein geschädigtes Wälzlager durch Zunahme der Reibenergie eine deutlich erhöhte Temperatur im Vergleich zu unbeschädigten Lagern. Eine Überwachung mit Hilfe der Thermografie kann also durch den Vergleich zwischen vergleichbar belasteten Lagern sowie mit früheren Analysen Rückschlüsse auf den Lagerzustand erlauben und so zu einer Vermeidung von Ausfällen beitragen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Analyse eines Getriebetragbilds. Hierbei wird die durch ein ungleichmäßiges Tragbild entstehende Reibungswärme mit Hilfe der Thermografie sichtbar gemacht, so dass eine Identifizierung der betroffenen Zähne anhand einer übermäßigen Erwärmung sichtbar wird.

Auch im elektrischen Bereich findet die Thermografie Anwendung. So können zum Beispiel überlastete Energieleitungen innerhalb eines komplexen Schaltschranks oder überhitzte Verbindungsstellen in Elektroschaltanlagen schnell auffindig gemacht werden.

*Grundlagen
der Schwingungstechnik*

2

The background of the cover is a solid green color. Overlaid on this are several white sine waves of varying amplitudes and frequencies, creating a sense of vibration or oscillation. In the lower right quadrant, there is a large, stylized white number '2' with a slight 3D effect and a shadow, indicating it is the second volume in a series.

2 Grundlagen der Schwingungstechnik

	Seite
2.1 Grundlegende Bewegungsformen	26
2.2 Periodendauer und Frequenz	28
2.3 Zeitbereich und Frequenzbereich	30
2.4 Amplitude	32
2.5 Phase.....	34
2.6 Messgrößen	35
2.7 Einheiten und ihre Umrechnung	39
2.8 Eigenfrequenz und Resonanz	43

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

I

2 Grundlagen der Schwingungstechnik

Hinsichtlich der Zustandsüberwachung von Maschinen können viele Parameter herangezogen werden, zum Beispiel Temperatur, Druck, Durchfluss, Volumenstrom, Schmierstoffzustand, Last und natürlich Schwingung. Mit einer Schwingungsmessung und ihrer Analyse können weitaus mehr Informationen über den Maschinenzustand in Erfahrung gebracht werden als mit den meisten anderen Betriebsparametern.

Bei Maschinen und Anlagen sind insbesondere stoßförmig angeregte und periodische Schwingungen von Interesse, die durch Schäden und Probleme an den Maschinenbauteilen hervorgerufen werden.

2.1 Grundlegende Bewegungsformen



Die DIN 1311-1 definiert den Begriff der Schwingung wie folgt:

„Eine Schwingung ist eine zeitliche Änderung einer Zustandsgröße eines Systems, bei der im allgemeinen diese Zustandsgröße abwechselnd zu- und abnimmt.“

Grundsätzlich wird demnach die oszillierende Bewegung eines mechanischen Körpers um seine stabile Gleichgewichtslage als Schwingung bezeichnet. Als grundlegende Bewegungsform wird die harmonische Schwingung betrachtet (Grundschiwingung).

Harmonische Schwingungen haben einen sinus- oder cosinusförmigen Verlauf. Da sich die Sinus- und die Cosinusfunktion nur durch eine Phasenverschiebung um 90° unterscheiden, wird oft nur verallgemeinernd von einer sinusförmigen Schwingung ausgegangen.

Die oszillierende Bewegung eines Körpers um seine stabile Gleichgewichtslage (NN = Nullniveau) ist durch das Beispiel eines Ein-Massen-Schwingers veranschaulicht, siehe **Bild 2-1**. Aufgrund seiner vertikalen Bewegungsmöglichkeit stellt er ein mechanisches System mit einem Freiheitsgrad dar.

Bild 2-1
Harmonische Schwingung

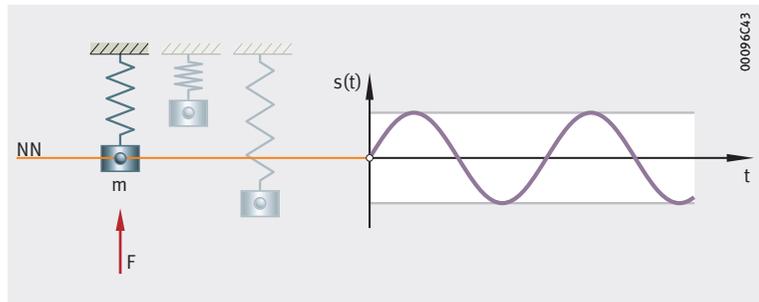
NN = Nullniveau

m = Masse

F = Kraft

$s(t)$ = Auslenkung zum Zeitpunkt t

t = Zeit

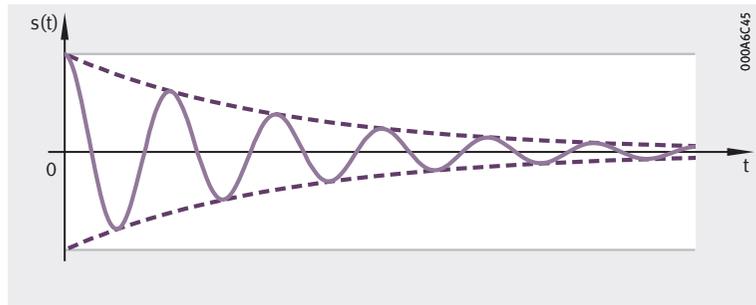


Ohne anregende Kraft F würde sich das schwingungsfähige System nicht bewegen und somit keine Schwingung entstehen. Nichts schwingt, solange es nicht durch irgendetwas angeregt wird. Üblicherweise ist es dieses „Irgendetwas“, welches bei der Maschinendiagnose von Interesse ist.

Wird das System nur ein Mal angeregt, führt es eine freie Schwingung aus, die bei Vernachlässigung der Reibung ungedämpft und permanent zu einer Auf- und Abbewegung führen würde. Ein System, bei dem die Dämpfung nicht vernachlässigt wird, stellt nach einiger Zeit seine oszillierende Bewegung ein. Diese abklingende Bewegung wird als gedämpfte Schwingung bezeichnet, siehe **Bild 2-2**, Seite 27.

Bild 2-2
Gedämpfte Schwingung

$s(t)$ = Auslenkung zum Zeitpunkt t
 t = Zeit



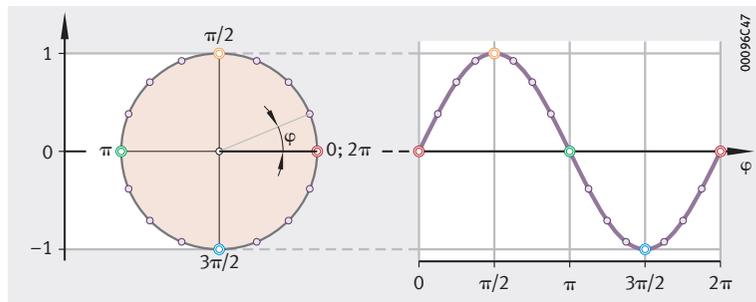
Wird das System periodisch angeregt, führt es erzwungene Schwingungen mit der Frequenz des Erregers aus. Die Amplitude, siehe **Abschnitt 2.4**, Seite 32, des Ein-Massen-Schwingers und die Phasendifferenz, siehe **Abschnitt 2.5**, Seite 34, zwischen ihm und dem Erreger hängen von der Erregerfrequenz ab.

Die Projektion der Kreisbewegung in ein zweidimensionales Achsensystem ergibt eine harmonische Schwingung. Bewegt sich ein Punkt gleichförmig, also mit konstanter Geschwindigkeit, auf einer Kreisbahn, wird er nach einem Umlauf seine Ausgangsposition wieder erreichen.

Die Analogie zwischen der harmonischen Schwingung und der Kreisbewegung ist in **Bild 2-3** dargestellt.

Bild 2-3
Projektion der Kreisbewegung

φ = Winkel



Die harmonische Schwingung lässt sich durch **Gleichung 2-1** beschreiben.

Gleichung 2-1
Harmonische Schwingung

$$s(t) = \hat{s} \cdot \sin \varphi(t) = \hat{s} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Legende

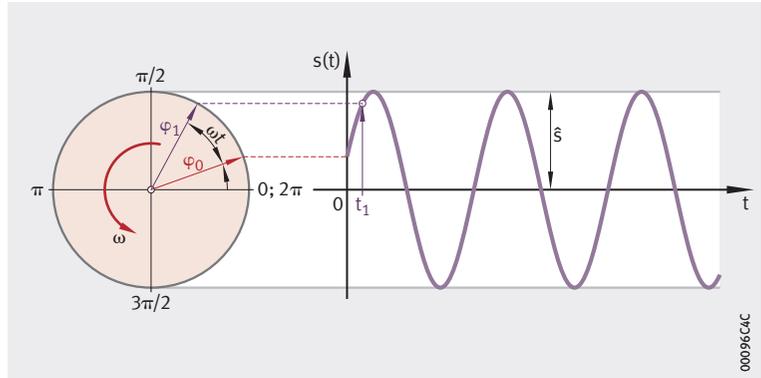
- $s(t)$ mm
Elongation oder Auslenkung zum Zeitpunkt t
- \hat{s} mm
Amplitude als maximale Entfernung aus der Ruhelage
- $\varphi(t)$ rad
Phasenwinkel des zugeordneten umlaufenden Punkts zum Zeitpunkt t
- ω s^{-1}
Winkelgeschwindigkeit des zugeordneten umlaufenden Punkts mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
- t s
Zeitpunkt der Zustandsbetrachtung
- φ_0 rad
Nullphasenwinkel zum Zeitpunkt $t = 0$ s.

Periodendauer und Frequenz

In **Bild 2-4** sind die wichtigsten Begriffe, die zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs einer harmonischen Schwingung benötigt werden, grafisch dargestellt.

Bild 2-4
Zeitlicher Verlauf einer harmonischen Schwingung

- φ_0 = Nullphasenwinkel
(zum Zeitpunkt $t = 0$)
- ω = Winkelgeschwindigkeit
- $s(t)$ = Auslenkung
zum Zeitpunkt t
- \hat{s} = Amplitude
- t = Zeit
- t_1 = Zeitpunkt t_1
- φ_1 = Phasenwinkel
zum Zeitpunkt t_1



In der grafischen Darstellung der harmonischen Bewegung werden die Zeit auf der Abszisse (horizontale Achse) und die Auslenkung auf der Ordinate (vertikale Achse) abgetragen.

2.2 Periodendauer und Frequenz

Vorgänge, bei denen sich ein Zustand nach einer bestimmten Zeitspanne regelmäßig wiederholt, werden als periodisch bezeichnet.

Bei einer periodischen Schwingung wiederholen sich die Werte der zu betrachtenden Zustandsgrößen nach einer Periodendauer T . Unter der Periodendauer wird die kürzeste Zeitspanne verstanden, die für das Durchlaufen eines Zyklus benötigt wird.

Demnach kann eine periodische Zustandsgröße $x(t)$ nach **Gleichung 2-2** ausgedrückt werden.

Gleichung 2-2
Periodizität

Legende

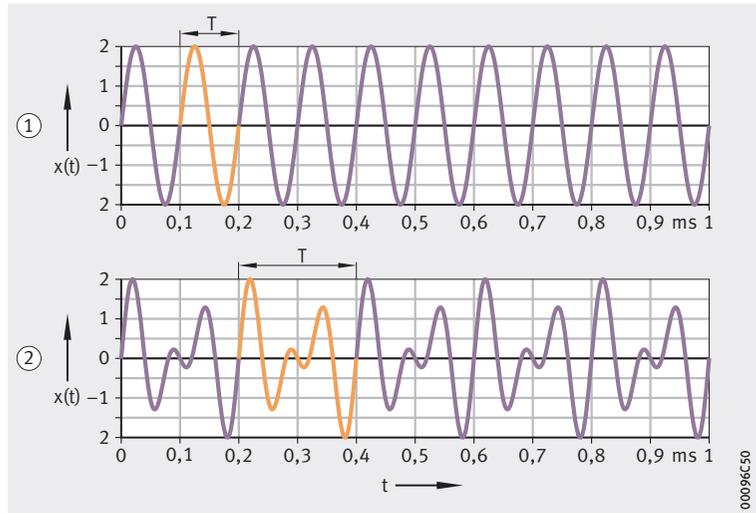
$$x(t) = x(t + n \cdot T)$$

$x(t)$	
Zustandsgröße x zum Zeitpunkt t	
t	s
Zeitpunkt der Zustandsbetrachtung	
n	–
ganzzahlig	
T	s
Periodendauer.	

Wie im ersten Beispiel in **Bild 2-5**, Seite 29, gezeigt, durchläuft eine harmonische Schwingung einen sich wiederholenden Zyklus in der Form, dass sie in einer Referenzposition (hier Nulldurchgang) beginnt, dann ein Maximum in positiver Richtung erreicht, wieder durch die Referenzposition läuft, dann weiter zu einem Minimum in die negative Richtung und schließlich wieder zurück in die Referenzposition gelangt. Dieser Vorgang wird als sinusförmige Bewegung bezeichnet und wiederholt sich nach einer bestimmten Zeit, der Periodendauer T . Die Periodendauer kann also direkt von der Zeitachse abgelesen werden. Üblicherweise wird sie in Sekunden oder Millisekunden gemessen.

Bild 2-5
Durchlaufen eines Zyklus

- ① Harmonische Schwingung
 - ② Periodische Schwingung
- $x(t)$ = Zustandsgröße
 t = Zeit
 T = Periodendauer



Für das Durchlaufen eines Zyklus ist es gleichgültig, ob es sich dabei um eine translatorische Bewegung eines Körpers, zum Beispiel vom positiven Extremwert zum nächsten positiven Extremwert, oder um eine Rotation einer Welle handelt. Ein Zyklus oder eine ganze Umdrehung entspricht einem Winkelbereich von 0° bis 360° . Oft wird auch das Bogenmaß von 0 bis 2π verwendet.

Das zweite Beispiel in **Bild 2-5** zeigt eine ebenfalls periodische, aber nicht harmonische Schwingung mit einem hervorgehobenen Zyklus (orange-farbene Linie), beginnend im Nulldurchgang.

Die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer, siehe **Gleichung 2-3**.

Gleichung 2-3
Periodendauer T

$$f = \frac{1}{T}$$

Legende

T s
Periodendauer
 f Hz
Frequenz.

Allgemein ist es auch möglich, die Frequenz aus einer Anzahl n von Schwingungszyklen und der dafür benötigten Zeit t zu berechnen, siehe **Gleichung 2-4**.

Gleichung 2-4
Frequenz f

$$f = \frac{n}{t}$$

Legende

f Hz
Frequenz
 n –
Anzahl der Schwingungszyklen
 t s
Zeit, die für die Anzahl der Schwingungszyklen benötigt wird.

Die Periodendauer T gibt Auskunft über die zeitliche Komponente der Schwingung, während der Momentanwert $x(t)$ eine Aussage über die örtliche Komponente trifft.

Die Frequenz f gibt an, wie oft etwas pro Zeiteinheit passiert, also wie oft zum Beispiel ein Lagergehäuse sich innerhalb einer Zeitspanne auf- und abbewegt oder wie oft ein Wälzkörper einen bestimmten Punkt in einem Lager passiert.

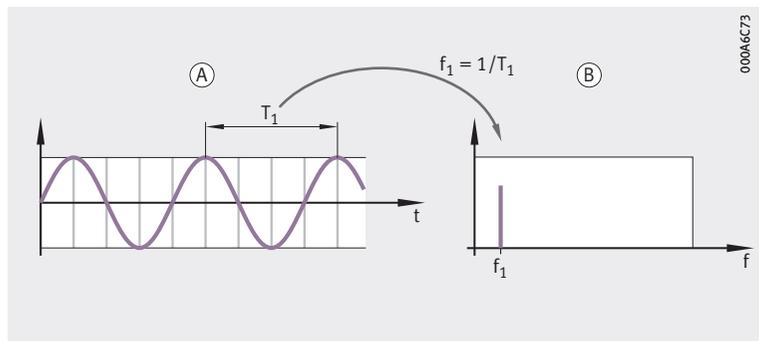
2.3 Zeitbereich und Frequenzbereich

Das Ziel der schwingungsbasierten Maschinenüberwachung ist es, die Ursache für ein auftretendes Maschinenproblem zu finden. Dazu wird immer versucht, so viele Informationen wie möglich aus den Messdaten zu gewinnen. Schwingungssignale können im Zeit- oder im Frequenzbereich analysiert werden. Basierend auf derselben Messung sind sie zwei unterschiedliche Darstellungsformate, die die Informationen liefern. Auf eine Gegenüberstellung von Zeit- und Frequenzbereich wird deshalb noch genauer in späteren Kapiteln eingegangen. In diesem Kapitel soll lediglich ein grundlegendes Verständnis für beide Darstellungsformate vermittelt und nicht detailliert auf den mathematischen Hintergrund eingegangen werden.

Wenn ein Schwingungssignal aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich übertragen wird, ist das Resultat ein Frequenzspektrum oder kurz Spektrum. Für das Schwingungssignal im Zeitbereich wird die Messgröße über die Zeitachse aufgetragen, beim Spektrum dagegen über die Frequenzachse, siehe **Bild 2-6**.

Bild 2-6
Zeit- und Frequenzdarstellung eines Sinussignals

Ⓐ Zeitbereich
Ⓑ Frequenzbereich
t = Zeit
 T_1 = Periodendauer
f = Frequenz
 f_1 = Frequenz der Sinusschwingung

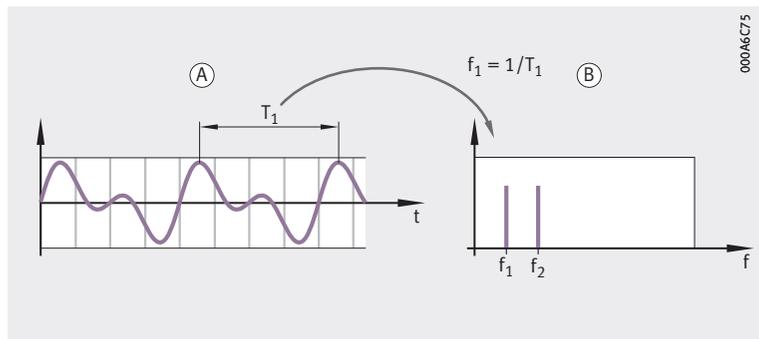


Bei der harmonischen Schwingung wird nach der Umwandlung des Signals vom Zeitbereich in den Frequenzbereich immer nur eine einzelne Frequenzkomponente als Spitze (Peak) im Spektrum sichtbar sein.

Im nächsten Schritt sollen zwei harmonische Schwingungen überlagert werden. Die einzelnen Signalanteile addieren sich zu einer komplexeren Signalform, die ebenfalls periodisch ist. Das Ergebnis der Überlagerung ist in **Bild 2-7** dargestellt. Aus der alleinigen Betrachtung des Zeitsignals ist jetzt nicht mehr erkennbar, aus wie vielen Einzelschwingungen das Zeitsignal gebildet wurde. In der Frequenzdarstellung sind jedoch die beiden Spitzen bei den Frequenzen f_1 und f_2 eindeutig erkennbar.

Bild 2-7
Zeit- und Frequenzdarstellung komplexerer Signalformen

Ⓐ Zeitbereich
Ⓑ Frequenzbereich
t = Zeit
 T_1 = Periodendauer
f = Frequenz
 f_1, f_2 = Frequenzen der harmonischen Komponenten



So lassen sich durch Addition von einzelnen harmonischen Schwingungen beliebige periodische Signalformen in unterschiedlicher Komplexität erstellen.

Werden diese periodischen Zeitsignale in den Frequenzbereich übertragen, können in den jeweiligen Spektren die einzelnen Frequenzkomponenten exakt ermittelt werden. Dann wird auch ersichtlich, dass periodische, nicht-harmonische Signale aus einer Grundfrequenz mit ganzzahligen Vielfachen bestehen, siehe **Bild 2-8**.

Bild 2-8
Periodische Signale

Ⓐ Zeitbereich
Ⓑ Frequenzbereich
 $t = \text{Zeit}$
 $f = \text{Frequenz}$

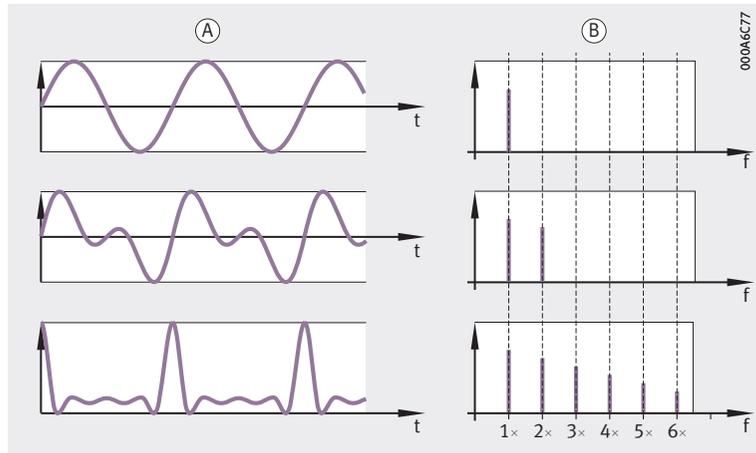
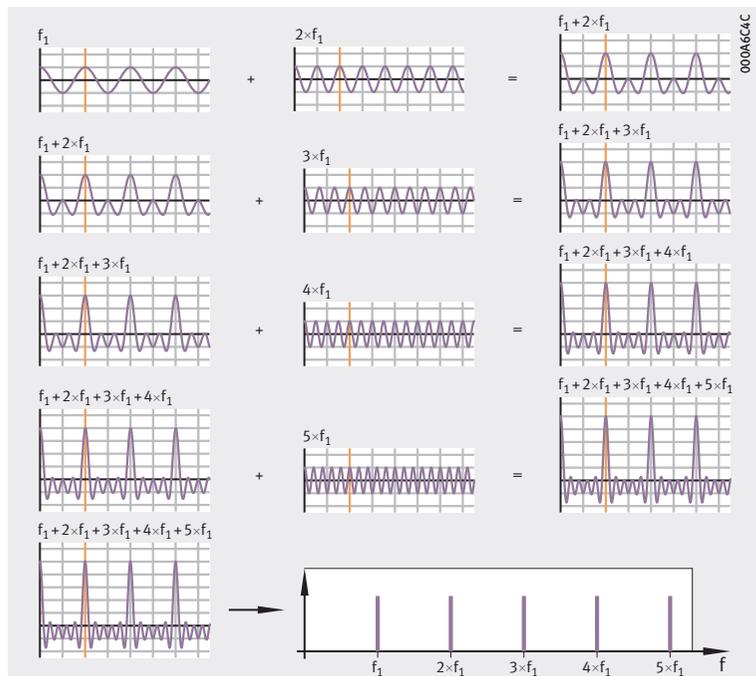


Bild 2-9 zeigt als Beispiel die einzeln durchgeführten Additionsschritte von einer Schwingung mit der Grundfrequenz f_1 bis hin zur fünffachen Grundfrequenz ($5 \times f_1$) und lässt dabei die Veränderung des Zeitsignals von einer harmonischen Schwingung bis hin zu einer angenäherten Pulsfolge nachvollziehen.

Bild 2-9
Harmonische Schwingung
mit Addition
einiger Vielfacher

$f = \text{Frequenz}$
 $f_1 = \text{Grundfrequenz}$



Diese Pulsfolge ähnelt den Signalen, wie sie durch periodische, stoßartige Anregungen auftreten. Damit lässt sich schlussfolgern, dass Schwingungen, die durch regelmäßige Stöße entstehen, durch viele Vielfache im Spektrum gekennzeichnet sind.

Amplitude

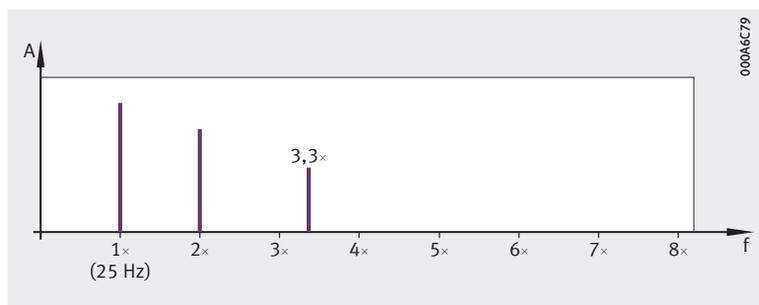
Diese Vielfachen der Grundfrequenz werden auch „Harmonische“ genannt. Eine Harmonische ist eine ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz f (also $2 \times f$, $3 \times f$, $4 \times f$, ...). In der Fachliteratur wird der Begriff der 1. Harmonischen nicht einheitlich verwendet. Teilweise wird dieser Begriff für $2 \times f$ verwendet, richtigerweise wird jedoch die Grundfrequenz als 1. Harmonische bezeichnet.

Neben der Darstellung von Spektren als Amplituden-Frequenz-Diagramme existiert auch eine Darstellung als Amplituden-Ordnungs-Diagramme. Dabei wird die Abszisse auf eine Referenzfrequenz bezogen, so dass alle Frequenzen als Vielfache dieser Frequenz angegeben werden können (zum Beispiel $2 \times$, $3 \times$, $3,3 \times$, $4 \times$). Üblicherweise wird dafür die Drehfrequenz einer rotierenden Welle als Referenz ($1 \times$) gewählt, so dass im Spektrum die Abszisse in Drehzahlordnungen skaliert ist.

Im Beispiel in **Bild 2-10** werden die angezeigten Ordnungen auf eine Referenzfrequenz von 25 Hz bezogen. Im Amplituden-Ordnungs-Diagramm (auch Ordnungsspektrum genannt) sind Peaks bei den Ordnungen $1 \times$, $2 \times$ und $3,3 \times$ eingezeichnet. Dies entspricht also Schwingungskomponenten bei 25 Hz, 50 Hz und 82,5 Hz.

Bild 2-10
Ordnungen: Bezug
auf eine Referenzfrequenz

$f = \text{Frequenz}$



2.4 Amplitude

Die quantitative Beschreibung von Schwingungen erfolgt über die Amplitude. Genau genommen ist mit dem Begriff Amplitude nur der Maximalwert \hat{x} von sinus- oder cosinusförmigen Vorgängen definiert, siehe **Gleichung 2-5**. In der Schwingungsüberwachung wird der Begriff Amplitude aber auch häufig bei nicht-harmonischen Schwingungen für den Maximalwert oder auch den Momentanwert der Schwingung verwendet.

Gleichung 2-5
Allgemeine Sinusfunktion

Legende

$$x(t) = \hat{x} \cdot \sin \varphi(t)$$

$x(t)$ mm, mm/s, mm/s²

Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit oder Schwingbeschleunigung zum Zeitpunkt t

\hat{x} mm, mm/s, mm/s²

Amplitude als maximale Entfernung aus der Ruhelage, maximale Geschwindigkeit oder maximale Beschleunigung

$\varphi(t)$ rad

Phasenwinkel mit $\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0$.