

- Mechanische Schwingungen -

Alle Bewegungen erzeugen gewollt, als Begleiterscheinung ungewollt oder auch durch Abnutzung Schwingungen und Stöße. Häufig stören sie, wenn sie nur groß genug sind: Das Auto rumpelt, der Kompressor vibriert, die bearbeiteten Teile werden ungenau und rau, der Baggerfahrer wird durchgerüttelt, ein Triebwerk fällt aus oder sogar ab, Pakete und ihr Inhalt werden beschädigt, beim Vorbeifahren eines Brummis klirren die Gläser im Schrank. Allen Störungen ist gemeinsam, dass die Ursache Schwingungen und Stöße sind. Werden diese ständig gemessen, werden falsche Funktion, Abnutzung und Schäden erkannt und können behoben werden.

Definition: Eine mech. Schwingung ist eine periodische Bewegung eines Körpers um seine Gleichgewichtslage. Zur Beschreibung kann der Körper als Massenpunkt betrachtet. Man kann die mech. Schwingung z.B. Mithilfe der sich zeitlich ändernden Größen Ort, Geschwindigkeit, Kraft und Energie beschreiben.

Eine Schwingung wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$y = f(t)$$

$$y = y_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$$

Vorraussetzungen für die Entstehung einer mech. Schwingung:

- Eine zur Gleichgewichtslage gerichtete Kraft
- Trägheit des schwingenden Systems

Wo kommen mechanische Schwingungen vor?

Mechanische Schwingungen sind in einem großen Frequenzbereich anzutreffen, z.B.:

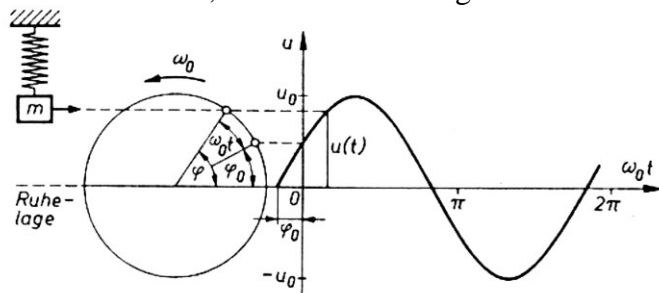
- Biegeschwingungen von Türmen, Brücken, Kräne (mHz bis Hz)
- Luftschall, Körperschall (Hz bis kHz)
- Ultraschall in Festkörpern und Flüssigkeiten (bis 100kHz)
- Oberflächenwellen bei Oberflächenwellenfiltern (auch über 100kHz)
- Dickeschwingungen von Quarzkristallen (MHz)

Arten von mech. Schwingungen:

- **Harmonische** Schwingungen
- Nichtharmonische Schwingungen
- Drehschwingung
- **Gedämpfte** Schwingung
- **Erzwungene** Schwingungen
- Resonanz
- **Schwingungsüberlagerung**
- **Gekoppelte** Schwingung
- Ungedämpfte Schwingungen
- Schwebung

Harmonische Schwingungen:
(freie Schwingung)

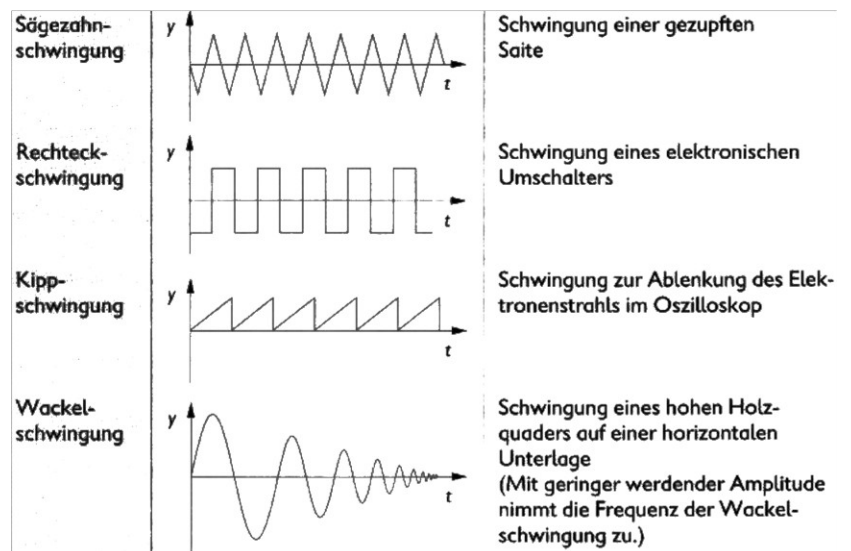
zeitliche Änderung d. charakteristischen physik. Größen erfolgt im Sinne einer Sinusfunktion oder Kosinusfunktion, z. B. Federschwinger



$$y = y_{\max} \sin(\omega t + \varphi) \text{ oder}$$

$$y = y_{\max} \cos(\omega t + \varphi)$$

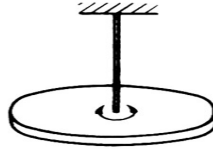
Nichtharmonische Schwingungen: nicht durch eine Sinus- oder Kosinusfunktion darstellbar



Drehschwingung:
Schwingung;

analoge Gesetzmäßigkeiten wie bei einer linearen

Wird durch Rückstellmoment ermöglicht, welches der Auslenkung proportional, aber entgegengerichtet ist $M_R \approx -\varepsilon$; Federkonstante entspricht der Winkelrichtgröße D



Gedämpfte Schwingungen:

gesetzmäßige Abnehmen der Amplitude (durch Reibung, Luftwiderstand u. ä.) im Verlauf einer Schwingung, Spezialfälle: Kriechfall, aperiodischer Grenzfall z.B.: Stoßdämpfer am Auto

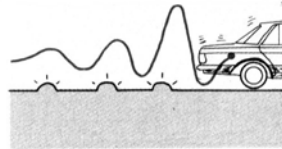
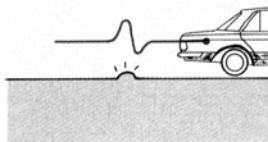
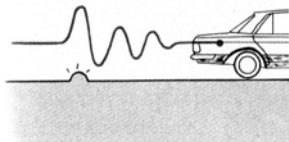
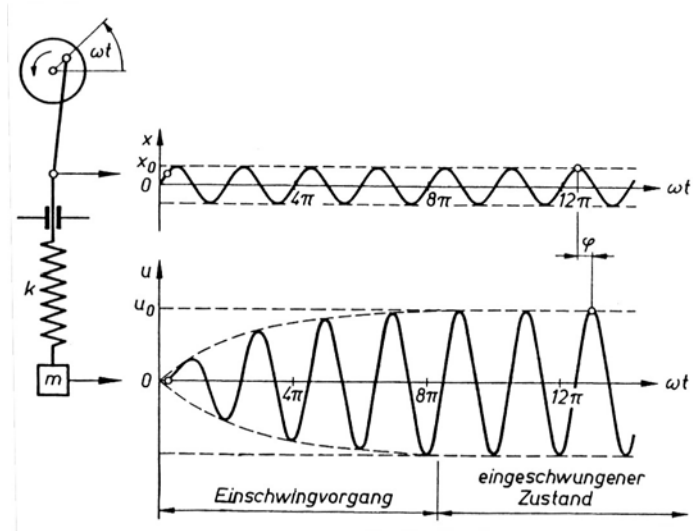


Abb. 117.1 Gedämpfte Schwingungen beim PKW nach einer Stoßanregung. a) Schwingfall – Sie benötigen neue Stoßdämpfer! b) beinahe Grenzfall – Stoßdämpfer in Ordnung!

Abb. 117.2 Stimmen Eigenfrequenz und Erregerfrequenz überein, dann kann die Resonanz katastrophale Folgen haben!

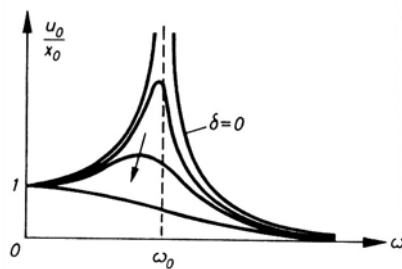
Erzwungene Schwingung:

auf das System wirkt von außen über eine Kopplung eine periodisch veränderliche Kraft, die das System zum Mitschwingen zwingt, z.B.: vom Motor angetriebene, nicht ausgewuchtete Welle, der bei zu fester Kopplung an das Fundament der Maschine dieses zum Mitschwingen bringt > Welle Erreger, Fundament Mitschwinger



Resonanz:

Amplitudenvergrößerung der erzwungenen Schwingung, wenn Erregerfrequenz in Nähe der Eigenfrequenz, z.B. Stimmgabel

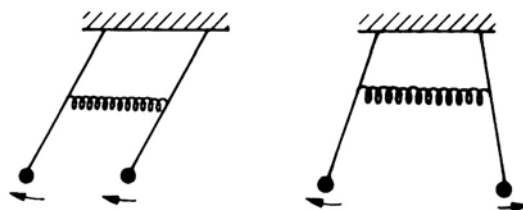


Schwingungsüberlagerung:

Überlagerung mehrerer Schwingungen zu einer Resultierenden, nach dem Superpositionsprinzip

Gekoppelte Schwingungen:

zwei miteinander gekoppelte Schwinger, die sich gegenseitig beeinflussen und dabei untereinander Energie austauschen






ungedämpfte Schwingungen:

Die durch den Widerstand oder Reibung dem System entzogene Energie wird durch periodisch zugeführte Energie ersetzt. Stimmen Erreger- und Eigenfrequenz überein, lassen sich mit geringstem Energieaufwand ungedämpfte Schwingungen erzeugen

Schwebung:

ist eine resultierende Schwingung, die bei Überlagerung von zwei Schwingungen auftritt, deren Frequenzen sich

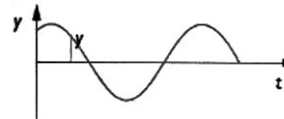
nur geringfügig unterscheiden. Die Amplitude der resultierenden Schwingung nimmt periodisch zu und ab. Die Frequenz der Schwebung ist gleich der Differenz der Frequenzen der beiden Schwingungen.

1. Schwingung	$f_1 = 80 \text{ Hz}$	f_1	
2. Schwingung	$f_2 = 90 \text{ Hz}$	f_2	
Schwebung	$f = f_2 - f_1$	f_3	

Physikalische Größen:

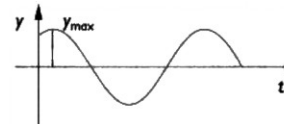
- **Elongation :** Augenblickswert der sich zeitlich und örtlich periodisch ändernden Größe
(Auslenkung)

$$y = y(t)$$



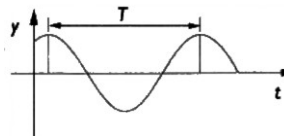
- **Amplitude :** Höchstwert der sich zeitlich periodisch ändernden physikalischen Größe

$$\hat{y}, y_m$$



- **Schwingungsdauer:** Dauer einer vollen Schwingung

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



- **Frequenz:** Anzahl der Schwingungen je Zeit(einheit) t

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

- **Kreisfrequenz:** Winkelgeschwindigkeit der Kreisbewegung, deren Projektion die harmonische Schwingung ergibt

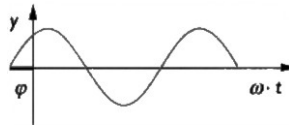
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

- **Phasenwinkel:** bestimmt den Schwingungszustand zur Zeit t

$$\varphi = \omega t + \varphi_0$$

- **Nullphasenwinkel:**
(Phasenkonstante)

Phasenwinkel zur Zeit $t=0$



- **Geschwindigkeit:**

verläuft bei sinusförmigen Schwingung Kosinusförmig und hinkt um eine Viertelperiode der Auslenkung hinterher, d. h. die Momentangeschwindigkeit des Schwingers ist stets gleich der Vertikalkomponente der Kreisbahngeschwindigkeit

$$v_B = r\omega = \hat{y}\omega$$

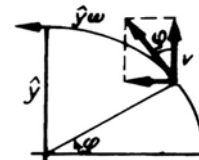
$$\cos \varphi = \frac{v}{v_B} = \frac{v}{\hat{y}\omega}$$

$$v = \hat{y}\omega \cos \varphi$$

$$\hat{v} = v_{\max} \Rightarrow \varphi = 0^\circ, 180^\circ$$

$$\Rightarrow \cos \varphi = \pm 1$$

$$\Rightarrow \hat{v} = \hat{y}\omega$$



- **Beschleunigung:**

Beschleunigung ist nicht konstant, sondern eine Funktion der Zeit $a = a(t) \rightarrow$ Max. Beschleunigung in Umkehrpunkten

$$a_r = a_{\max}$$

$$\sin \varphi = \frac{a}{a_{\max}}$$

$$a = a_{\max} \sin \varphi$$

$$a_{\max} = \omega^2 \hat{y}$$

$$a = -\omega^2 \hat{y} \sin \varphi$$

$$\text{wenn } \varphi = 90^\circ, 270^\circ$$

$$\Rightarrow \sin \varphi \pm 1$$

$$a = -\omega^2 \hat{y}$$

Minus kennzeichnet, dass Beschl. entgegengesetzt d. Auslenkung und zur Ruhelage gerichtet ist



Wie werden die Schwingungen erzeugt?

Zur Untersuchung müssen entweder Schwingungsmuster erzeugt werden, wie sie der Belastung in der Anwendung entsprechen oder solche, die alle möglichen Frequenzen enthalten.

- unter anwendungstypischen Bedingungen (z.B. Fahrt über eine Landstrasse)
- durch Anregung mit einem Vibrator (Shaker) oder Rütteltisch
- durch Anregung mit Stoss-Impulsen (Impulshammer, Modalanalyse)

Bei der Modalanalyse wird eine komplexe mechanische Struktur auf die Lage und Dämpfung von Resonanzstellen untersucht und es werden mögliche Schwingungsformen des Gesamtsystems bestimmt. Die Modalanalyse ist ein experimentelles Verfahren, bei dem die Reaktion der mechanischen Struktur auf eine impulsförmige Anregung (mit Impulshammer) an verschiedenen Stellen gemessen wird. Zur Visualisierung und zur Simulation lässt sich die Struktur in einem Computer mittels der Methode der Finiten Elemente (FEM) nachbilden.

Technische Nutzung

Wozu dient die Schwingungsmessung?

Die Schwingungsüberwachung von Maschinen ermöglicht eine kontinuierliche Kontrolle. Beginnende Schäden zeigen sich oft frühzeitig durch Veränderung des Schwingungsspektrums. Eine Schwingungsanalyse (Klangprobe) ermöglicht eine Qualitätsprüfung in der laufenden Fertigung (Dachziegel, Geschirr).

Eine Analyse der Eigenfrequenzen von Bauteilen (Gerätechassis, Maschinen, Abdeckungen, Autotüren) lässt konstruktive Änderungen zu, so dass auftretende Schwingungen nicht durch die Resonanzen verstärkt werden. Dazu werden die Schwingungen an der zu untersuchenden Struktur gemessen.

Relative Schwingungen

- werden mit **Wegaufnehmern** gemessen (Inkrementalgeber, Digital-codierte Weg-Aufnehmer), wobei die Verschiebung zwischen zwei definierten Bezugspunkten erfasst wird

Absolute Schwingungen

- werden mit Längsschwingungssystemen gemessen, wobei über die Schwingmasse auf die Erdoberfläche bezogen wird
- **seismische Schwingungsaufnehmer** können lineare Schwingwege, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen ohne Festpunkt z.B. von Maschinenbauteilen, Gebäuden, Land-, Wasser- und Raumfahrzeugen und bei geophysikalischen Untersuchungen erfassen

Welche Sensoren werden für die Schwingungsmessung eingesetzt?

Sensoren gibt es für die Bewegungsgrößen: Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg. Sie zeigen auch bei idealem Verhalten eine unterschiedliche Frequenzabhängigkeit.

Für die Messung der **Geschwindigkeit**:

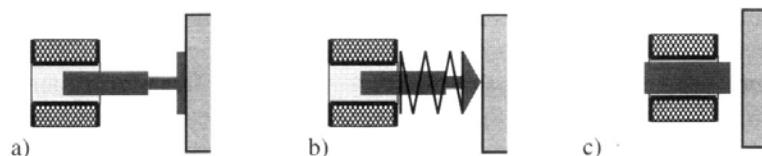
- elektrodynamischer Geschwindigkeitssensor
- Laser-Doppler-Verfahren

Für die Messung der **Beschleunigung**:

- kapazitiver Beschleunigungs-Sensor
- piezoelektrischer Beschleunigungs-Sensor
- piezoresistiver Beschleunigungs-Sensor

Schwingungsaufnehmer (vibration transducer)

Schwingungwegmessung mit Relativbewegungsaufnehmern



a) formschlüssige Kopplung

b) kraftschlüssige Kopplung

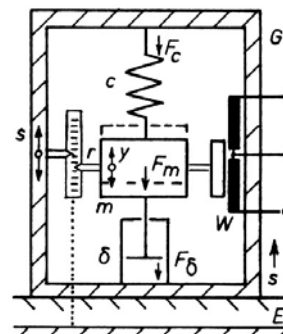
c) berührungslose Kopplung

Aufbau und Wirkungsweise von absoluten (seismischen) Längsschwingungsaufnehmer

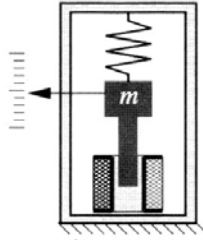
In einem Gehäuse G befindet sich ein mechanisches Längsschwingungssystem mit einem Freiheitsgrad, das mit Masse m , Federkonstante c und Dämpfungsfaktor δ ein federkraftherregtes System mit Relativdämpfung (zwischen Masse und Gehäuse) darstellt. Das mit dem Messobjekt starr verbundene Aufnehmergehäuse G folgt der Messobjektbewegung $s(t)$ im Raum. Wird das Gehäuse mit der Beschleunigung $a = d^2 s/dt^2$ beschleunigt, wird die einwirkende Kraft über die Feder c auf die Masse m übertragen, und diese führt infolge ihrer Trägheit eine andere Raumbewegung $y(t)$ aus. Zwischen Gehäuse G und Schwingmasse m entsteht eine entgegengerichtete Relativbewegung $r = -(s - y) = y - s$, die z.B. mit einem induktiven Weg-Aufnehmer W nach Bild 110 gemessen werden kann. Die Schwingmasse m führt eine absolute Bewegung im Raum aus, und zwar

$$y = r + s$$

Bild 110
Seismischer Längsschwingungs-Aufnehmer
 m Masse, δ Dämpfungsfaktor, c Federkonstante, F Kräfte
 s Schwingweg des mit dem Meßobjekt verbundenen Gehäuses G im Raum,
 y Schwingweg der Masse m im Raum,
 r relativer Schwingweg zwischen Masse m und Gehäuse G,
W Weg-Aufnehmer, E Erdoberfläche

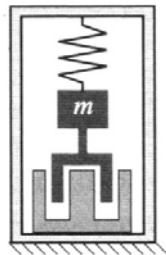


Schwingwegmessung mit Absolutbewegungsaufnehmern



Zur Schwingwegmessung werden als Wegaufnehmer üblicherweise Tauch- oder Differenzialtauchankeraufnehmer eingesetzt.

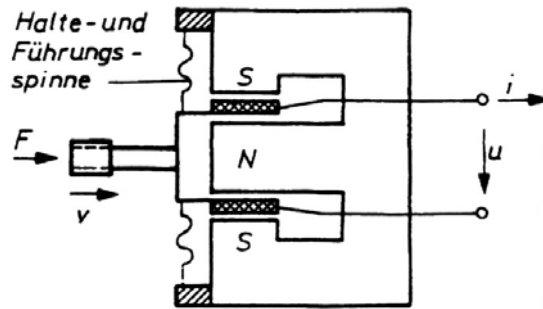
Schwingungsgeschwindigkeitsaufnehmer (velocity transducer)



Bei der Schwingungsgeschwindigkeitsmessung sind als Geschwindigkeitsaufnehmer Tauchspulsysteme (Tauchspule im Magnetfeld) nach dem elektrodynamischen Prinzip üblich. Hier wird entsprechend dem Induktionsgesetz eine geschwindigkeitsproportionale Spannung induziert ($u \approx ds / dt$).

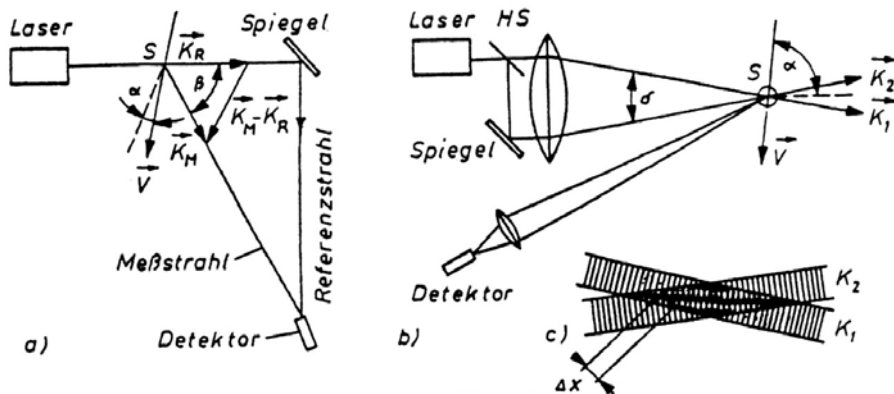
Die Empfindlichkeit beträgt maximal $s_v = \frac{u}{v} = \frac{1V}{cm/s}$.

Elektrodynamische Geschwindigkeitsaufnehmer



Er wandelt Geschwindigkeit in Spannung, Strom in Frequenzen um.

Laser-Doppler-Verfahren



- a) Referenzstrahlmethode
- b) Zweistrahlmethode
- c) Interferenzbild der Strahlen bei der Zweistrahlmethode

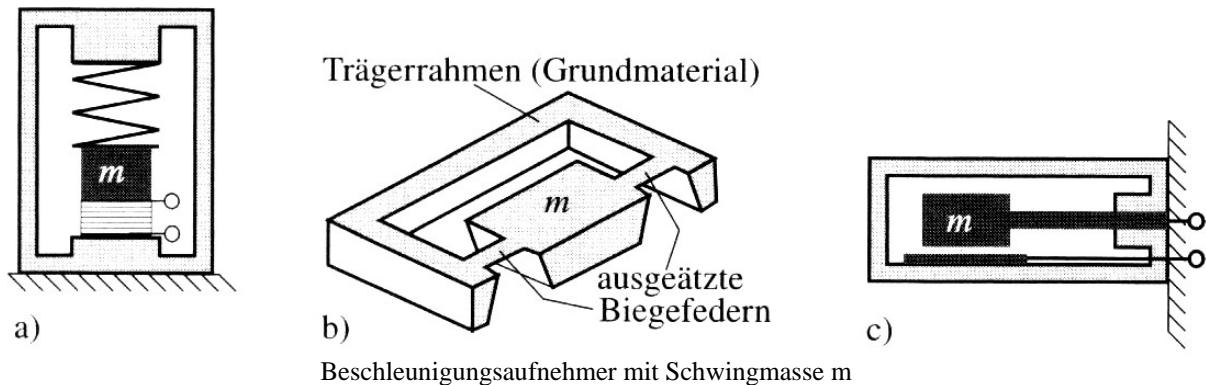
Ein Laserstrahl trifft im Messpunkt auf kleine, in der Strömung mitschwimmende Partikel und wird an diesen gestreut. Hierbei erfährt die Frequenz des Streulichtes eine Dopplerverschiebung, die von der Geschwindigkeit der Partikel herrührt → reflektierende Strahlen haben höhere oder niedrigere Frequenzen je nach Anstrahlrichtung

Eigenschaften: Sehr großer Messbereich; für Gase und Flüssigkeiten möglich.

Voraussetzung sind die Lichtdurchlässigkeit des Fluids und das Vorhandensein einer geringen Anzahl kleiner Partikel. Das Verfahren erlaubt die punktuelle, mehrdimensionale Messung auch instationärer Strömungsgeschwindigkeiten.

Beschleunigungsaufnehmer (accelerometer)

Beschleunigungsaufnehmer gibt es in vielen Varianten.



a) piezoelektrischer Beschleunigungssensor
c) kapazitiver Beschleunigungssensor

b) monolithischer Si-Beschleunigungssensor

Das Funktionsprinzip von Beschleunigungsmessungen beruht auf dem Prinzip der trägen Masse. Da aber träge und schwere Masse physikalisch nicht unterschieden werden können, reagieren alle Beschleunigungsmesser zusätzlich auf Schwerkkräfte (Gravitation). Im Sensorgehäuse ist eine Masse in einer Richtung (der sensitiven Achse) frei beweglich aufgehängt und wird durch Federn in einer mittleren Position gehalten. Wird das Sensorgehäuse einer Beschleunigung ausgesetzt, so bleibt die Masse aufgrund ihrer Trägheit zurück. Diese Auslenkung wird detektiert und durch einen Regelkreis über eine Spule auf Null geregelt. Der durch die Spule fließende Strom ist direkt proportional zur Beschleunigung des Sensorgehäuses in Richtung der sensitiven Achse (Sundstrand).

Übliche Beschleunigungsmesser können Beschleunigungen bis $\pm 300 \text{ m/s}^2$ mit einer Auflösung von 10^{-5} m/s^2 messen. Sie sind robust, einfach anzuwenden, sehr genau und eignen sich ideal zur Bestimmung der Eigenfrequenzen und Schwingungsmodi von Bauwerken.

$$E = \frac{ds}{da} = \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{m}{c}$$

E	Empfindlichkeit
S	Auslenkung der Masse
A	Beschleunigung
ω_0	Eigenkreisfrequenz des Aufnehmers
m	Masse
c	Federkonstante des Verformungskörpers

Piezoelektrische Beschleunigungssensoren bestehen aus zwei Grundbestandteilen:

- Piezoelektrisches Material
- Seismische Masse

Die eine Seite der Piezoscheibe ist mit der sogenannten seismischen Masse verbunden, die andere mit einem starren Träger. Wenn diese Kombination in mechanische Schwingung versetzt wird, wirkt über die seismische (träge) Masse eine Kraft auf die Piezoscheibe. Nach dem Newtonschen Gesetz ist die entstehende Kraft das Produkt aus Beschleunigung und Masse. Durch den piezoelektrischen Effekt entsteht an den Elektroden eine Ladung, die proportional zur Kraft und damit auch zur Beschleunigung ist (vgl. Bild 2).

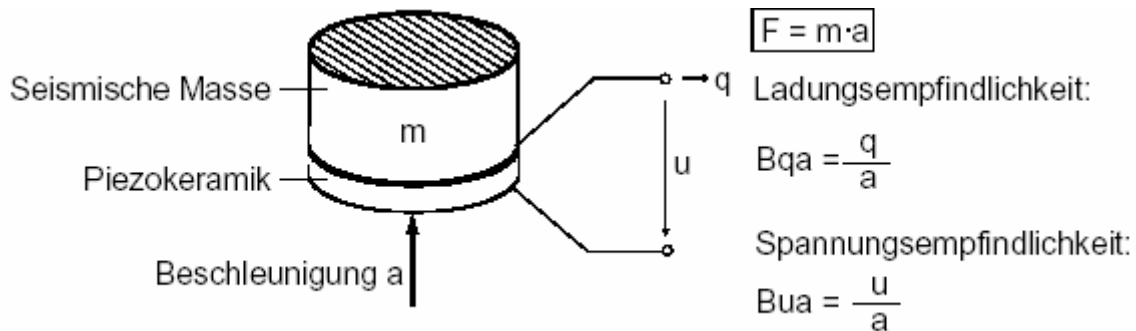


Bild 2: Wirkprinzip eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers

Die folgende Tabelle stellt die am meisten verbreiteten Sensortypen für Schwingungen den piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern gegenüber:

Sensortyp	Vorteil	Nachteil
Piezoresistiv	-misst auch statische Beschleunigung	-eingeschränkte Auflösung durch Widerstandsrauschen -nur für tiefe und mittlere Frequenzen -Versorgungsspannung erforderlich
Elektrodynamisch	-misst auch statische Beschleunigung	-nur für tiefe Frequenzen
Kapazitiv	-misst auch statische Beschleunigung -preiswerte Herstellung mit Halbleitertechnologie	-geringere Auflösung -zerbrechlich

Monolithische Sensoren werden durch gezieltes Ätzen aus Silizium hergestellt. In die als Biegebalken wirkenden Abschnitte der Struktur sind Dehnungssensoren eindotiert. Diese Sensoren sind klein, zuverlässig, haben kurze Ansprechzeiten und lassen sich kostengünstig herstellen.

Kapazitive Sensoren sind ebenfalls sehr klein und lassen sich mit Hilfe von Verfahren der Mikromechanik herstellen.

Schwingungsmessung

Jeder weiß, wie eine Porzellantasse klingt, wenn sie einen Riss hat. Den Unterschied zur unbeschädigten hört man sofort. Hierbei wird die Schwingung durch Anschlagen erzeugt,

vom Ohr aufgenommen und mit dem im Gehirn durch Erfahrung abgespeicherten Klangmuster der intakten Tasse verglichen und ausgewertet. Die allgemein Aufgabe der Schwingungsmessung ist das erfassen von Frequenzen und diese zu interpretieren.

Beispiele für Schwingungen in der Praxis:

Glockenkräfte

Das Bild zeigt die Bewegungen des Turms unter dem Einfluss der Glockenkräfte (Abh. von Masse, Anzahl, Schlagzahl...). Typisch für das Schwingungsverhalten ist die Anregung der Struktur durch die 3. Harmonische der Pendelschwingung, die in praxi (bei großen Türmen) in der Nähe der Turmeigenfrequenz liegen kann. Bei kleineren Türmen kann dagegen die 5. Harmonische Resonanznähe aufweisen.



Lüfterräder

Lüfterschwingungen als Folge von Unwuchten der Lüfterräder können vor Ort ohne Demontage durch Auswuchten reduziert werden.

Schrägseilswingungen

Handelsübliche hydraulische "Kfz-Stoßdämpfer" wurden mehrfach erfolgreich zur Dämpfung von Schwingungen der Schrägseile von Brücken eingesetzt.

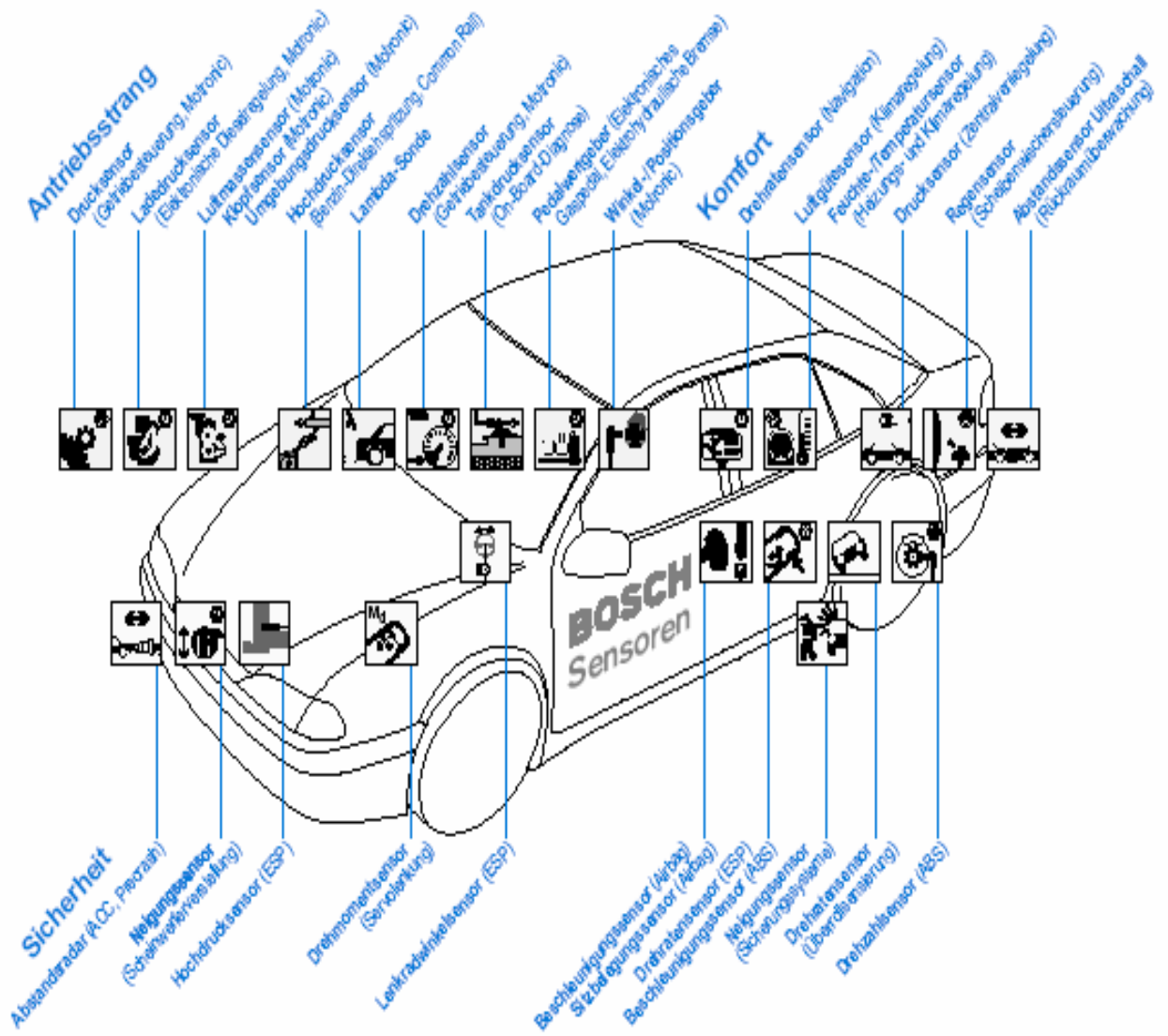


Spielortung / Störgeräuschanregung

(Verfahrens zur Ortung defekter Kugelkopf Gelenke)

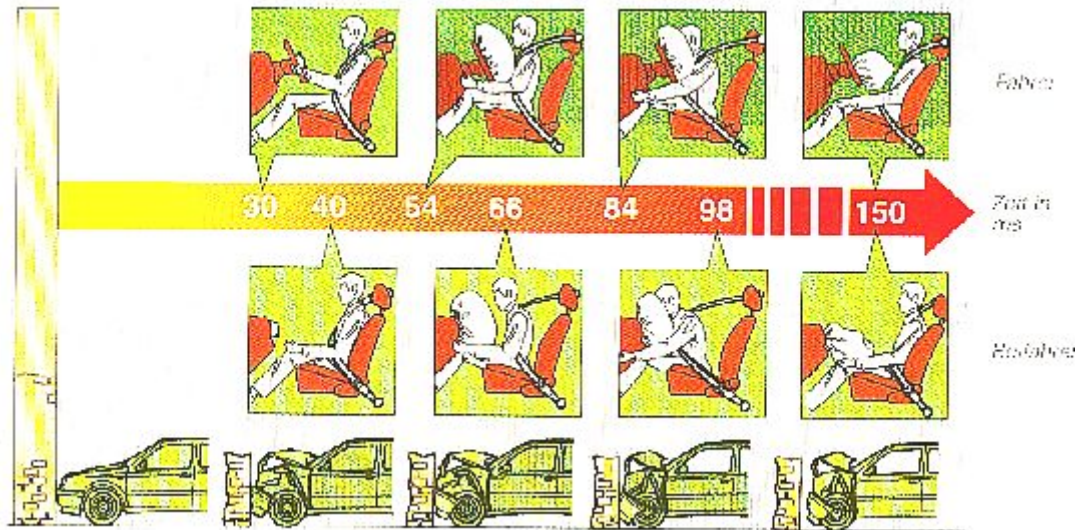


Dabei ist es möglich, im stationären und eingebauten, und somit verspannten Zustand, Spiel an Kugelkopfgelenken messtechnisch zu erfassen und zu erkennen. In Verbindung mit dem nebenstehenden Erreger kann mit dem entwickelten Messverfahren eine sichere "Gut – Schlecht" Aussage getroffen werden. Darüber hinaus wird der Erreger eingesetzt, um diverse Störgeräusche im Bereich Fahrwerk und Interieur anzuregen und somit zu lokalisieren.



Airbag

Auslösung und Ablauf der Airbagzündung

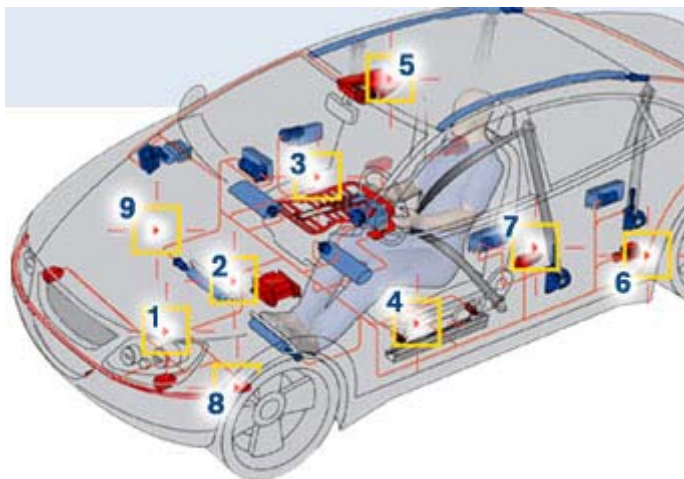
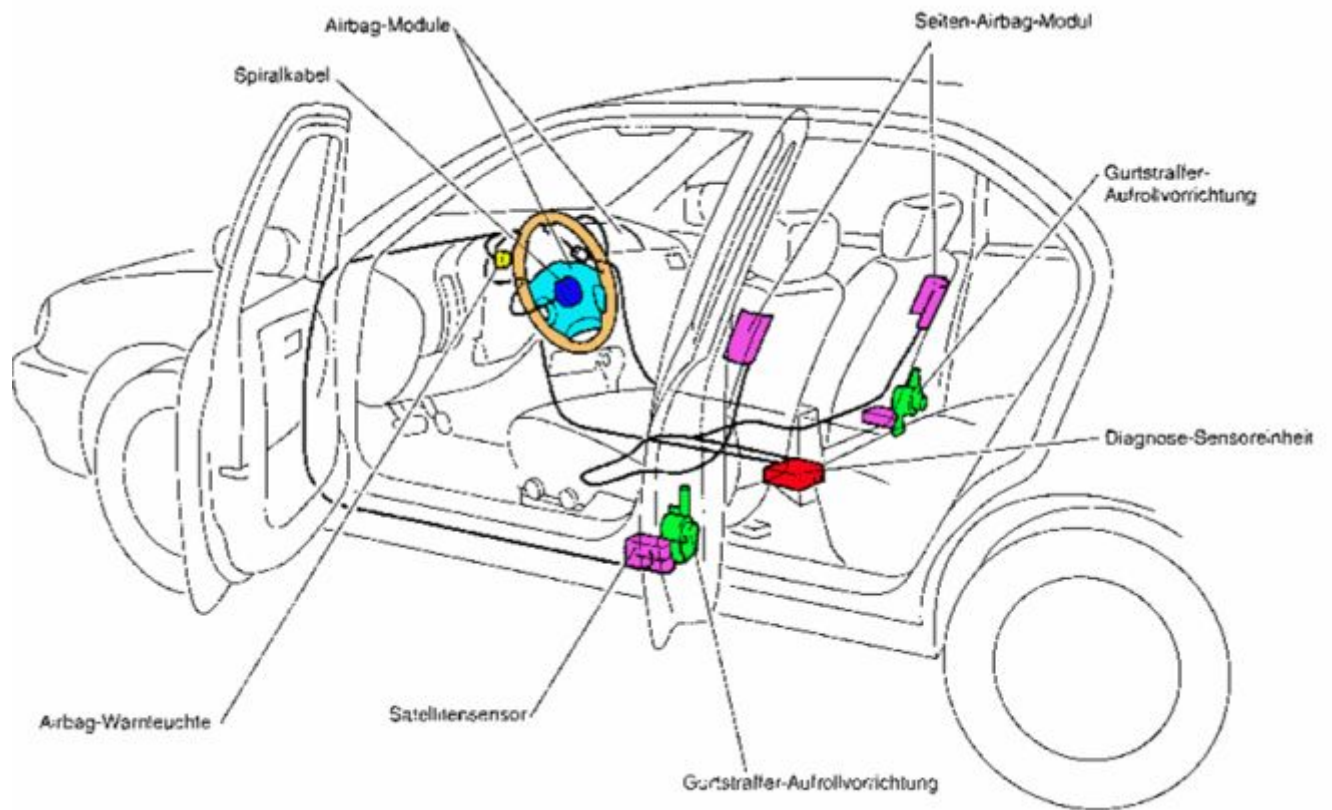


Crashphase (Bild: Bosch)

- Zum Zeitpunkt „Null“ berührt das Fahrzeug die Crashwand.
- 25 ms später aktiviert der elektronisch Sensor die Zündpille des Fahrermoduls.
- Nach 30 ms ist die Abdeckung des Fahrermoduls aufgerissen und der Airbag wird aufgeblasen.
- Nach ca. 55 ms ist der Fahrerairbag vollständig aufgeblasen und der Fahrer taucht ein.
- Nach 85 ms ist der Fahrer maximal in den Airbag eingetaucht und bewegt sich wieder vom Lenkrad weg.
- Die Zündung des Beifahrerairbags und das Eintauchen des Beifahrers in den Airbag erfolgen um ca. 10 ms später, da der Beifahrer einen weiteren Weg bis zum Armaturenbrett zurückzulegen hat.

Nach ca. 150 ms ist das gesamte Unfallgeschehen abgeschlossen, die Insassen befinden sich in ihrer Ausgangsposition und beide Airbags sind weitgehend geleert.

Airbagkomponenten

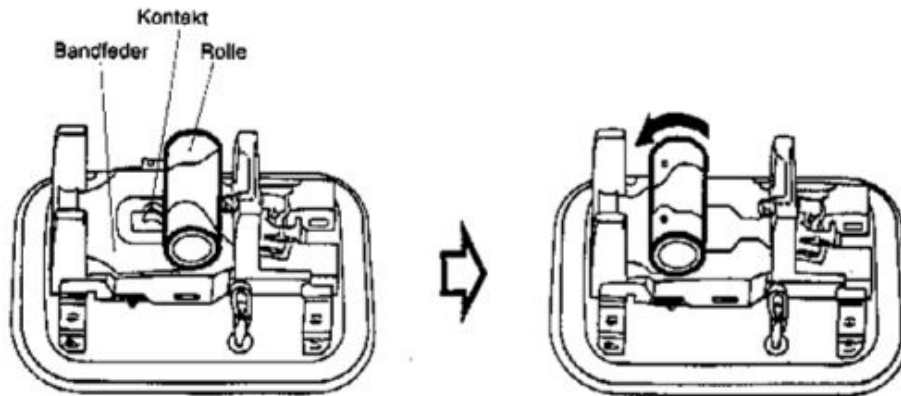


Grafik von Bosch

- 1 Upfront-Sensor
- 2 Zentrales Airbag-Steuergerät mit integrierter Überrollsensierung
- 3 Insassenklassifizierungsmatte mit automatischer Kindersitzerkennung
- 4 Gewichtssensor
- 5 Out-of-Position-Sensor
- 6 Seitenairbag-Sensor (Beschleunigung)
- 7 Seitenairbag-Sensor (Druck)
- 8 Fußgängeraufprallsensor
- 9 Busarchitektur

Zur Erfassung der Fahrzeugverzögerung und zum Auslösen der Zündung ist die Information von 2 Beschleunigungssensoren erforderlich, die unabhängig voneinander arbeiten.

Crashsensor



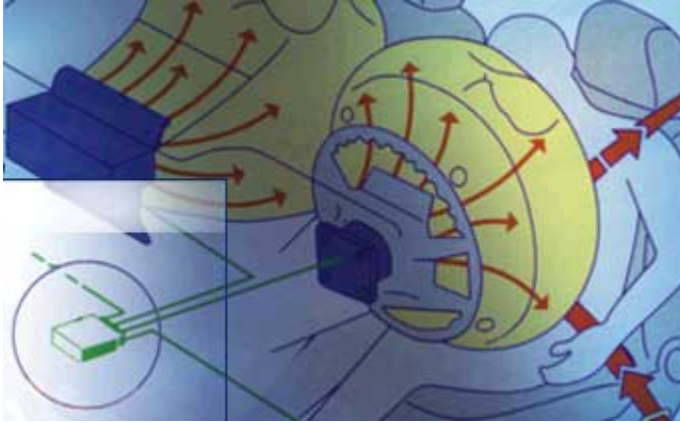
Werden Frontsensoren eingesetzt sind immer zwei vorhanden. Hierbei handelt es sich um ein mechanisch arbeitendes Feder/Masse- System (siehe Bild). Die mechanischen Sensoren reagieren bei einer Beschleunigung, die im Falle eines Unfalls für die Insassen zu ernsthaften Verletzungen führen können (3-5g/ ca. ab 40km/h). Die Zündung erfolgt nur, wenn mindestens ein Frontsensor und der Sicherheitssensor im Steuergerät ausgelöst haben. Die Gewichtsrolle ist innen hohl und dient zur Aufnahme von Kalibriergewichten. Sie ist mit einem gegenläufigen Bronzefederband verbunden (umwickelt). Das Bronzefederband ist mit dem anderen Ende mit dem Gehäuse verbunden. Dadurch wird die Rolle sicher geführt, so dass sie nur bei einer ganz bestimmten Krafteinwirkung und Stoßrichtung aus der Ruhelage rollen kann. Im Auslösemoment rollt die Gewichtsrolle über die Kontaktfeder und der Stromkreis zum Airbag-Steuergerät ist geschlossen. Im Sensor ist für Diagnosezwecke ein hochohmiger Widerstand integriert.

Der Beschleunigungssensor



- Der Sensor reagiert rein mechanisch auf den abrupten Stopp des Fahrzeuges
- Beim Aufprall wird die Siliziummasse des Sensors ausgelenkt
- Dabei entsteht zwischen den beweglichen und starren Stegen im Sensor eine Änderung der elektrischen Kapazität
- Die Fühler können wegen ihrer winzigen Masse verzögerungsfrei

reagieren. So liefern sie bereits in den ersten Millisekunden eines Aufpralls lebenswichtige Informationen an das Airbag-Steuergerät.

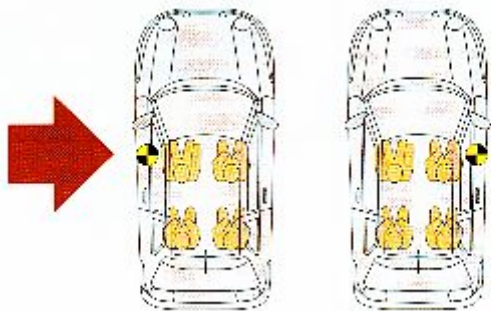


Schutzphase (Bild Bosch)

Vorgang der Auslösung



Erkennt das Steuergerät für Airbag einen Crash in einem Winkel von je ca. 30° zur Fahrzeuglängsachse so werden in Abhängigkeit des Sicherheitssensors und der Fahrzeugbestückung die entsprechenden Airbags aktiviert.



Wird eine Beschleunigung von den Seitensensoren erfasst und vom Sicherheitssensor bestätigt werden nur die Seitenairbags ausgelöst.



Die Auslösung erfolgt durch die Zündung eines pyrotechnischen Treibsatzes. Die hierbei entstehenden Abbrandgase füllen den Airbag.

Test von Rotorblätter

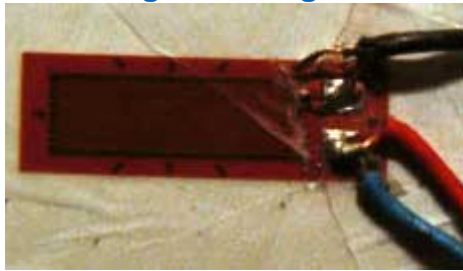


Das Bild (Video) zeigt, wie bei einem 32 m langen Rotorblatt die Dauerfestigkeit getestet wird. Dazu wird es über die Breitseite des Blattprofils 5 Millionen mal zyklisch gebogen. Ein solcher Volltest dauert rund drei Monate. Die Blätter werden mit einer Frequenz gebogen, die nahe bei ihrer Eigenfrequenz liegt. Unter Eigenfrequenz versteht man jene Frequenz, mit der das Blatt schwingt, wenn man es einmal in eine Richtung anstößt. Ein Blatt hat in den beiden Belastungsrichtungen verschiedene Eigenfrequenzen: über ihre Längskante sind Rotorblätter steifer und haben daher in dieser Ebene eine höhere Eigenfrequenz. Jedes Blatt wird durch einen Elektromotor, der auf dem Blatt montiert ist durch ein Gewicht auf- und ab in Schwingung versetzt. Das Fundament für diesen Test muss sehr fest sein: Es besteht aus 2 000 Tonnen Beton.

Materialien für Rotorblätter

Gewöhnlich werden für Rotorblätter gekreuzte Schichten von Glasfasermatten verwendet, die mit Kunststoffen wie Polyester imprägniert sind (GFK = glasfaserverstärkter Kunststoff). Warum Rotorblätter testen? Rotorblätter müssen getestet werden, um sicherzustellen, dass die Lamine halten, d.h. die Schichten des Rotorblattes sich nicht voneinander lösen (Entlaminierung). Außerdem wird verifiziert, dass die Fasern unter wiederholter Beanspruchung nicht brechen.

Belastungsmessung



Dehnmessstreifen (kurz: DMS) werden eingesetzt, um die Biege- und Dehnbelastung des Rotorblattes sehr genau zu messen. Ein DMS besteht aus flachen elektrischen Widerständen und wird auf die Oberfläche eines Rotorblattes geklebt.

Materialermüdung

Windkraftanlagen sind [schwankenden Winden](#) und damit schwankenden Kräften ausgesetzt. Das gilt besonders dann, wenn sie in Gegenden mit sehr [turbulentem](#) Wind stehen.

Teile, die einer ständig wiederholten Biegebelastung ausgesetzt sind, wie z.B. Rotorblätter, können nach und nach Risse ausbilden, bis sie der Belastung nicht mehr standhalten und brechen.

- extrem wichtig ist Vorausberechnung der Kräfte durch Biegung und Dehnung der einzelnen Teile und des ganzen Verbandes → Strukturdynamik

Strukturdynamik: Ein Beispiel

Der 50 m hohe Turm einer Windkraftanlage schwingt ungefähr alle 3 Sekunden hin und her. Die Frequenz, mit der unser Turm oszilliert, wird auch als Eigenfrequenz des Turmes bezeichnet. Diese Eigenfrequenz hängt sowohl von der Höhe des Turmes als auch von der Windstärke, der Art des Stahles und dem Gewicht von Gondel und Rotor ab. Dies ist normalerweise nicht weiter schlimm, da die Rotorblätter wie ein Bremsfallschirm diese Schwingungen stark dämpfen. Kommen die Windböen jedoch im Gleichtakt wie die Turmschwingung so wird die Schwingung immer stärker.

Wenn nun der Rotor genau so dreht, dass ein Blatt immer dann den Turm passiert, wenn sich dieser gerade auf einer Maximalposition seiner Schwingung befindet, kann das Rotorblatt diese Schwingung entweder dämpfen oder verstärken.

Die Rotorblätter selbst sind auch flexibel und können z.B. einmal pro Sekunde vibrieren. Genau wie auch der Turm, kann das Rotorblatt in zwei Richtungen schwingen: Die Schlagschwingungen in Richtung der Maschinenachse, sowie die Schwenkschwingungen in Drehrichtung des Rotors.

Es ist also sehr wichtig, die Eigenfrequenzen jeder Komponente zu kennen, um eine möglichst schwingungsarme Anlage zu bauen. Normalerweise müssen die Rotorblätter bis zu einer Genauigkeit von unter einem Kilogramm ausgewuchtet sein. Bei Vereisung der Rotorblätter können schnell mehrere hundert Kilo Eis an den Blättern hängen. Löst sich diese Eis ungleichmäßig ab, führt dies zu gewaltiger Unwucht und damit verbundenen gefährlichen Turmschwankungen. Weitere Ursachen können gelöste Auswuchtgewichte, Wasseransammlung oder Abplatzungen nach Blitzeinschlag sein.

Probleme entstehen durch Resonanzerscheinungen, die auch stabile Bauwerke in kurzer Zeit zerstören können. Bekannt ist das Beispiel der Brücke, die problemlos 100 Panzer trägt, jedoch durch 1000 Soldaten im Gleichschritt (Gleichtakt) zum Einsturz gebracht wird. Eine Windenergieanlage ist durch solche Vorgänge genauso gefährdet.

Besonders empfindlich sind Rotorblätter und Türme. Es können je nach Höhe des Turmes stattliche Schwingweiten von 1-2m erreicht werden.

Im Gegensatz zu Rotorblattschwingungen wodurch nur die Rotorblätter und evtl. Kupplungen des Triebstrangs, Getriebe beschädigt werden, führt ein Turmschaden meistens zur Zerstörung der ganzen Maschine.

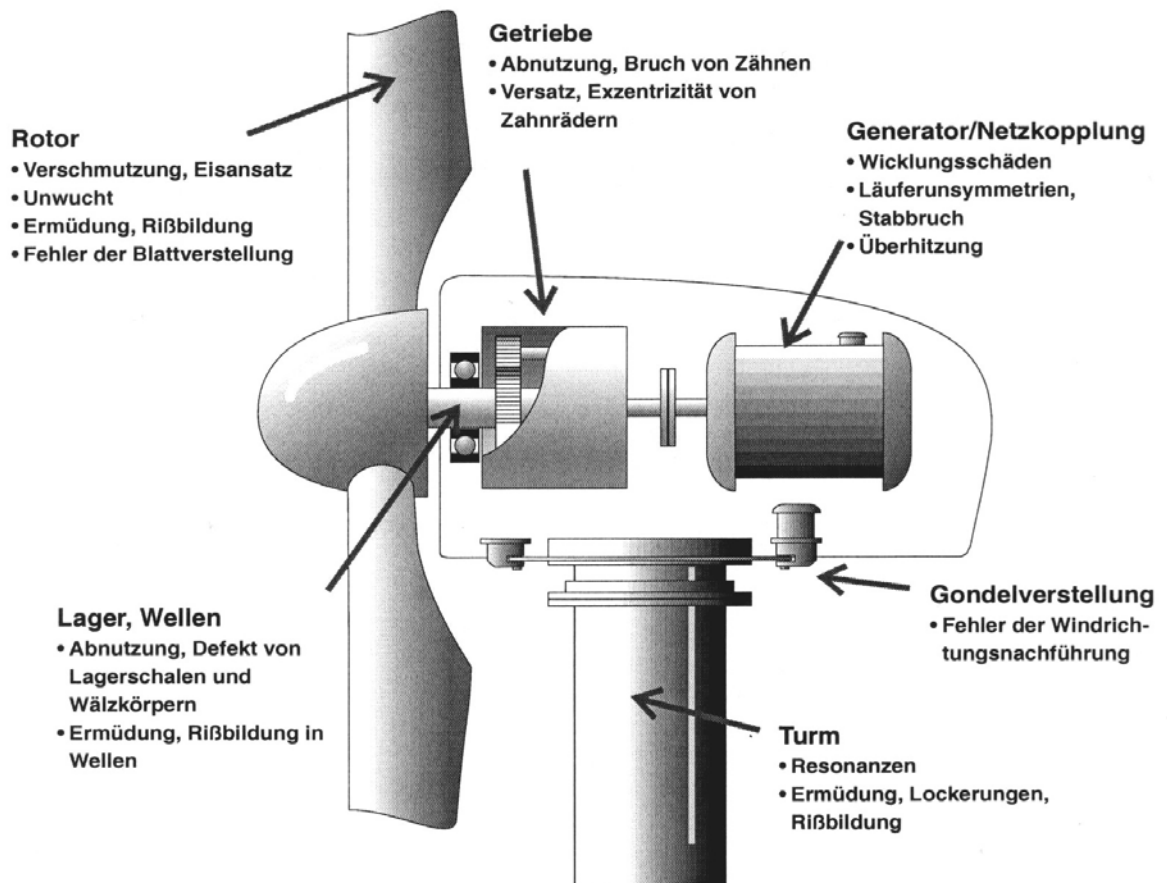


Abb. 2: Windkraftanlagen unterliegen hohen Betriebsbelastungen. Hieraus können sich unterschiedliche Fehler und Schäden an den Hauptkomponenten einer Anlage ergeben.

Geeignete Schwingungswächter

Bei den heute von mehreren Herstellern angebotenen Schwingungswächtern handelt es sich um Beschleunigungsaufnehmer. Mittels einer Elektronik werden gezielt die gefährlichen Frequenzen verstärkt die bei Turm oder Rotorblattschwingungen auftreten. Andere unerwünschte Frequenzen werden rausgefiltert. Bei korrekter Einstellung ist es nun möglich diese gemessenen Beschleunigungen mit den zulässigen Grenzwerten für Turm und Rotorblätter zu vergleichen. Erkennt die Anlagensteuerung eine Überschreitung der Grenzwerte kann die Anlage abgeschaltet oder aber in einen Sicherheitsbetrieb gebracht werden, bis die Schwingung sich beruhigt hat. Da hier gezielt die Art der Schwingung erkannt

wird, kann die Anlagensteuerung auch auf die richtige Reaktion programmiert werden. Außerdem gibt es dem Betreiber wichtige Information über die Ursache der Störung. Diese Schwingungswächter kosten je nach Ausführung und erfassten Schwingachsen 500€ bis 1000€

Glockenturmschwingungen

Glocken sind physikalische Pendel mit großen Ausschlagwinkeln. Ihr Kraftspektrum enthält beachtliche Anteile höherer harmonischer. Davon sollte keine mit einer Eigenfrequenz des Turmes übereinstimmen. Eine Messung gibt zuverlässig Aufschluss, ob derartige Verhältnisse vorliegen und Schäden möglich sind.



Schwingbeiwerte (Brücken)

Durch Messungen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden die für die Berechnung von Brücken erforderlichen Schwingbeiwerte experimentell ermittelt. Dazu wurden eine Reihe von Überfahrten mit gleichem Lastenzug, aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt.

Als Einflussfaktor wurden die Gleiswelligkeiten zuvor mit spezieller Lehre vermessen.



Lärmschutzhalle

Durch Schwingungsmessungen wurde die dynamische Beanspruchung im Dach einer Lärmschutzhalle bei Anregung durch den Testbetrieb von Flugzeugmotoren bestimmt.



Oberstes Ziel der Schwingungsmessung ist die Schwingungsreduzierung

Auftretende Schwingungen an Maschinen, Strukturen und auf Fahrzeugen oder Schiffen müssen für einen sicheren und komfortablen Betrieb oft deutlich reduziert werden. Zur Reduzierung von Schwingungen gibt es verschiedene Optionen wie:

- Resonanzen vermeiden, Abstände zwischen Eigenfrequenzen und Erregerfrequenzen vergrößern
- Erhöhung der Strukturdämpfung durch zusätzliche Dämpferelemente
- Einsatz von aktiven und passiven Schwingungstilgern (Dämpfersysteme)
- Schwingungsisolierung und elastische Aufstellung
- Reduzierung der Erregerkräfte (Auswuchten)

Schwingungstilger

Schwingungstilger dienen der Reduzierung von Schwingungen an Windkraftanlagen. Das Prinzip der Schwingungstilgung beruht auf einer gegenswingenden Masse, wodurch die schwingenden Bauelemente beruhigt werden. Gleichzeitig wird durch die besonderen Dämpfungseigenschaften des Elastomers dem gesamten Schwingungssystem Energie entzogen.

Drehschwingungen kommen sehr häufig aber bestimmt nicht allein nur am Kurbeltrieb des Hubkolbenmotors vor. Hier überträgt der Kolben die lineare Bewegung auf die Kurbelwelle. Was aber, wenn wie bei modernen Diesel-Direkteinspritzern diese Bewegung nicht gleichmäßig erfolgt? Wenn plötzlich enorme Drehmomente freigesetzt werden, kann durch das Spiel im Kurbeltrieb das gesamte System schwingen und neben einer eventuellen Geräuschentwicklung auch zu mechanischen Schäden führen. Deshalb ist rechtzeitiges Dämpfen von Drehschwingungen sehr wichtig.

Es gibt noch andere Einbauorte für Drehschwingungstilger. Diese können z.B. auf (längeren) Antriebswellen angeordnet sein. Wichtig ist die Nähe zum Auslöser der Schwingungen.