

Körperschall und Vibrationen

Accelerometer und Ladungsverstärker

Akustik-Serie Teil 13

Vibrationen sind mechanische Schwingungen. Sie begegnen uns überall im täglichen Leben, sei es im Arbeitsbereich oder in unseren Fortbewegungsmitteln. Des Weiteren treffen wir auf mechanische Schwingungen im Maschinenbau, im Baugeerbe usw. Um etwas über die Wirkung mechanischer Schwingungen auf unseren Körper sowie auf unser Wohlbefinden zu erfahren, möglichst in Maß und Zahl, sind entsprechende Messungen notwendig.

Hilfsmittel für Untersuchungen

Ein unverzichtbares Hilfsmittel für derartige Untersuchungen sind Beschleunigungsaufnehmer, allgemein bekannt auch unter der Bezeichnung Accelerometer. Im Gegensatz zu Untersuchungen im Bereich des Luftschalls und/oder des Wasserschalls, wo man mit Mikrofonen bzw. Hydrofonen an jedem beliebigen Punkt des Schallfeldes Messwerte registrieren kann, muss man sich bei mechanischen Schwingungen bzw. beim Körperschall damit begnügen, Messwerte nur an der von außen zugänglichen Oberfläche schwingender Objekte aufnehmen zu können.

Die aussagekräftigste Größe, die man dort aufnehmen kann, ist die Schwingbeschleunigung a (Einheit: m/s^2), aus der man durch einfache Integration die Schwingschnelle oder Schwinggeschwindigkeit v (Einheit: m/s) und durch zweifache Integration schließlich den Schwingausschlag x (Einheit: m) erhält.

Mit der praktischen Durchführung der Integration hat der Praktiker heutzutage nichts mehr zu tun. Das übernehmen speziell dafür vorgesehene Messgeräte,

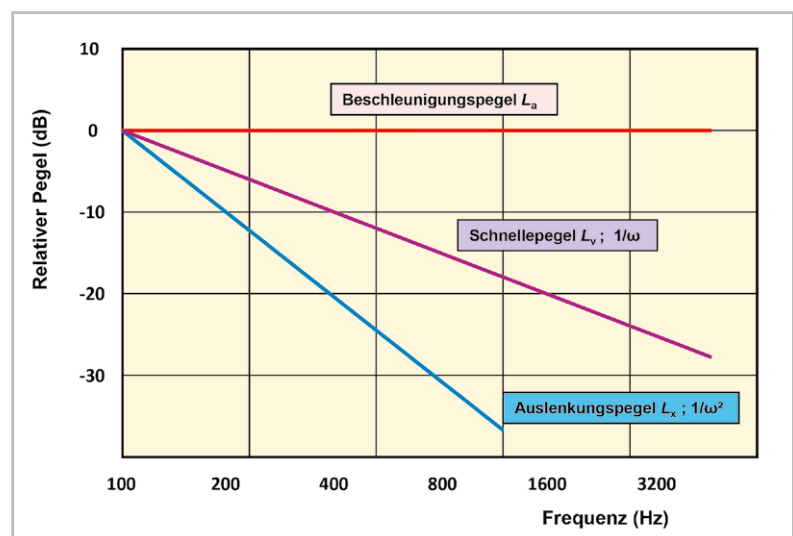


Bild 1: Grundsätzliche Frequenzgänge von Schnelle- und Auslenkungspegeln, gewonnen aus der ursprünglichen Messung der Schwingbeschleunigung durch nachfolgende einfache bzw. doppelte (elektronische) Integration, wie das bei den heutigen Messgeräten allgemein möglich ist. Beim $1/\omega$ -Frequenzgang fällt die Gerade mit -6 dB pro Oktave ab, beim $1/\omega^2$ -Frequenzgang geschieht das mit -12 dB pro Oktave.



Zur Information:

In leicht verständlicher Form vermitteln wir eine **Einführung in die Arbeitsgebiete der technischen Akustik – einschließlich Schwingungstechnik – und der Elektroakustik.**

Themengebiete:

- Akustische Grundbegriffe – Schallfeldgrößen, Pegel, Resonatoren (ELVjournal 2/2019)
- Schallausbreitung – Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption (ELVjournal 3/2019)
- Elektromechanische Analogien – Analogie erster und zweiter Art, Ersatzschaltbilder (ELVjournal 4/2019)
- Elektroakustische Wandler – Wandlerprinzipien und ihre Gesetze (ELVjournal 5/2019)
- Mikrofone – vom Studiomikrofon bis zum Subminiaturmikrofon (ELVjournal 6/2019)
- Kopfhörer – elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer (ELVjournal 1/2020)
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox (ELVjournal 2/2020)
- Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler (ELVjournal 4/2020)
- Raum- und Bauakustik – Sabine'sches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche (ELVjournal 4/2020)
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie (ELVjournal 5/2020)
- Persönlicher Schallschutz – von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mittels „Antischall“ (ELVjournal 6/2020)
- Akustische Messräume – reflexionsarme Räume, Impedanz-Messrohre und Hallräume (ELVjournal 1/2021)
- **Körperschall und Vibrationen – Accelerometer und Ladungsverstärker**
- Wasserschall – Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks
- Ultraschall und Infraschall – natürliche und industrielle Quellen
- Akustische Messtechnik – Terz- und Oktavpegel, Intensitätsmessung, Korrelationsanalyse, Cepstrumanalyse und akustische Peilung

Theoretische Zusammenhänge werden nur so weit vertieft, wie es für das Verständnis des Stoffs notwendig ist. Auf mathematische Ausdrücke (Gleichungen, Formeln) wird im Text so weit wie möglich verzichtet. Anschauliche Illustrationen unterstützen diese Beiträge. Autor dieser Serie ist Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit.

an denen man lediglich die einfache oder doppelte Integration manuell auswählt. Der Praktiker muss nur verstehen, was der von ihm gewählte Integrationsvorgang bedeutet und bewirkt (Bild 1).

Grenzfrequenz und Koinzidenzeffekt

Mechanische Schwingungen bzw. Vibrationen sind nicht zwangsläufig gleichzusetzen mit Körperschall. Ein Festkörper kann vibrieren, ohne dabei Körperschall zu erzeugen, der dann auch als hörbarer Luftschall abgestrahlt wird. Ein schwingender Festkörper, z. B. eine Platte oder eine Wand, strahlt seine Schwingungen nicht zwangsläufig als hörbaren Luftschall ab. Das geschieht erst oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz f_{gr} (siehe Bild 2). Unterhalb dieser Frequenz erfolgt (theoretisch) keine Schallabstrahlung, während oberhalb von f_{gr} , dort, wo die Biegewellenlänge λ_B größer ist als die Wellenlänge λ in Luft, Schall abgestrahlt wird. Diese Abstrahlung erfolgt bei jeder Frequenz unter einem jeweils anderen Winkel α . Bei der Grenzfrequenz erreicht dieser Winkel schließlich einen Wert von 90° und die Schallabstrahlung erfolgt nur noch streifend, siehe Bild 3.

Erinnert sei an dieser Stelle noch an einen ganz besonderen Effekt, der mit der Ausbreitung von Biegewellen auf Festkörpern zu tun hat, nämlich an den Vorgang der Dispersion. Darunter versteht man die Tatsache, dass die Ausbreitung von Biegewellen bei jeder Frequenz mit einer anderen Geschwindigkeit erfolgt. Das gibt es bei keiner anderen Wellenart.

Die Höhe der oben genannten Grenzfrequenz hängt im Wesentlichen ab von der flächenbezogenen Masse m' (Einheit: kg/m^2) und von der Biegesteifigkeit B (Einheit: Nm) des schwingenden Festkörpers: $f_{gr} \sim (m'/B)^{0,5}$. Diese Frequenz steht in einem engen Zusammenhang mit dem sogenannten Koinzidenzeffekt. Dieser Effekt bildet die Grundlage für das Verständnis der Abstrahlung von Luftschall durch schwingende Festkörper, siehe dazu Bild 3. Der Begriff als solcher wurde bereits im ELVjournal 4/2020 [1] erwähnt, und zwar bei der Erklärung der Schalldurchlässigkeit von Wänden in der Bauakustik. Auch dort spielen die Begriffe Grenzfrequenz und Koinzidenzeffekt eine wichtige Rolle.

Wie zu Beginn dieses Beitrages schon erwähnt, werden mechanische Schwingungen messtechnisch am besten durch die Bestimmung einer ganz bestimmten

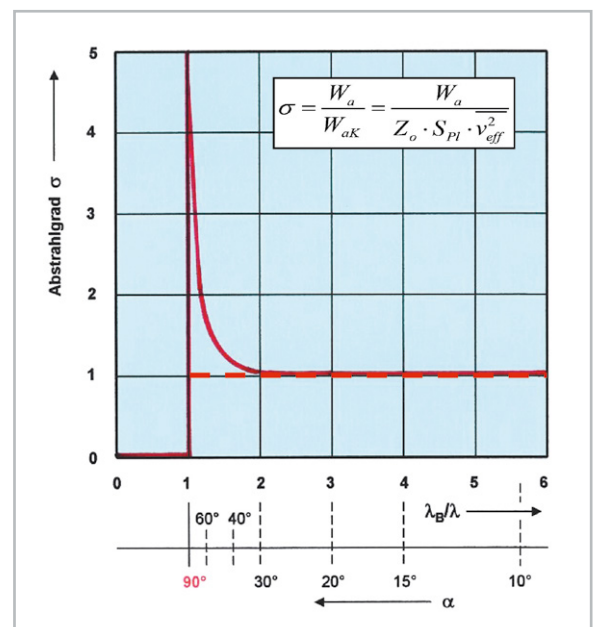


Bild 2: Darstellung des Abstrahlgrades σ einer unendlich großen, zu Biegeschwingungen angeregten, ungedämpften Platte, in Abhängigkeit von der relativen Wellenlänge λ_B/λ . Bei $\lambda_B/\lambda = 1$ erfolgt die Schallabstrahlung streifend ($\alpha = 90^\circ$). Darunter, d. h. bei $\lambda_B/\lambda < 1$, wird (theoretisch) kein Schall abgestrahlt. Bei einer gedämpften Platte kann die Kurvenspitze bei $\lambda_B/\lambda = 1$ bis auf den gestrichelt dargestellten Verlauf zurückfallen.

λ = Wellenlänge in Luft

λ_B = Wellenlänge der Biegeschwingung

W_a = abgestrahlte Leistung von einer Platte infolge von Biegeschwingungen

W_{ak} = abgestrahlte Leistung von derselben, aber konphaschwingenden Platte

Größe, nämlich der Schwingbeschleunigung, erfasst und bewertet. Für die Messung verwendet man Beschleunigungsaufnehmer oder Accelerometer, auf die im nachfolgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

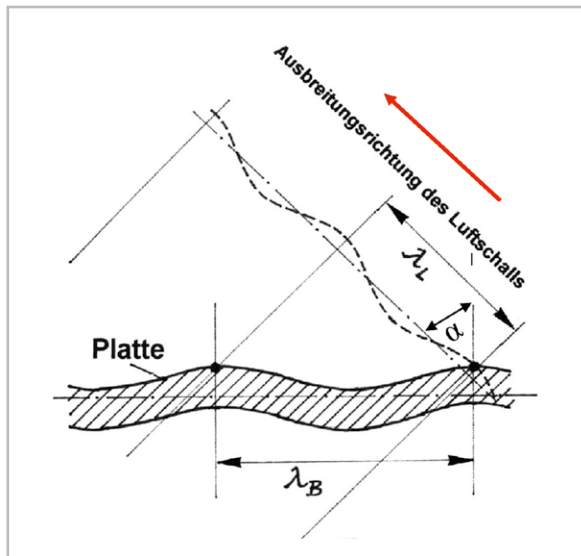


Bild 3: Spuranpassungs- oder Koinzidenzeffekt bei einer Biegeschwingung angeregten Platte.
 λ_L = Wellenlänge in Luft, λ_B = Wellenlänge der Biegeschwingung
 α = Richtung des abgestrahlten Luftschalls, bezogen auf die Senkrechte zur Platte

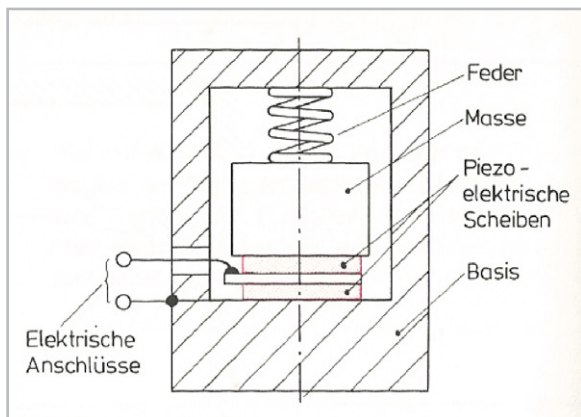


Bild 4: Grundsätzlicher Aufbau eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers. Das eigentliche Wandlerelement besteht aus zwei entgegengesetzt polarisierten, piezoelektrischen Scheiben. Auf der oberen der beiden Scheiben ruht eine seismische Masse, die durch eine Feder mechanisch vorgespannt ist.

Accelerometer

Accelerometer sind Sensoren zur Aufnahme von Schwingbeschleunigungen. Den grundsätzlichen Aufbau eines Beschleunigungsaufnehmers zeigt das Bild 4. Das eigentliche Wandlerelement bilden darin zwei Scheiben aus entgegengesetzt polarisierter Piezokeramik. Im Allgemeinen bestehen diese Elemente aus Bariumtitanat oder Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). Piezokeramiken geben, im Gegensatz zum klassischen Quarz, ein höheres Ausgangssignal ab. Auf beiden Scheiben ruht eine relativ große seismische Masse, die durch eine Feder mechanisch vorgespannt ist. Wird der Aufnehmer in axialer Richtung beschleunigt, so wird auf die Piezoscheiben eine Kraft ausgeübt, die der Beschleunigung der seismischen Masse proportional ist. Die dabei vom Wandlerelement erzeugte elektrische Spannung u ist infolgedessen der Beschleunigung a proportional.

Am Ausgang des Wandlers erscheinen als elektrische Messgrößen sowohl eine elektrische Spannung u als auch schwingung proportionale Ladungen q . Für Beschleunigungsaufnehmer bzw. Accelerometer gibt es somit zwei verschiedene Arten von Empfindlichkeits-Kenngrößen, nämlich den Spannungs-Übertragungsfaktor T_u als auch den Ladungs-Übertragungsfaktor T_q . Beide Kenngrößen sind miteinander verknüpft, und zwar über die elektrische Kapazität C_w des piezoelektrischen Wandlerelements, siehe Bild 5.

Dazu ein Zahlenbeispiel: Für einen konkreten Aufnahmewandler betragen die Daten (gemäß Datenblatt) z. B. $C_w = 0,6 \text{ nF}$ und $T_u = 0,23 \text{ mV/m}\cdot\text{s}^{-2}$. Dafür ergibt sich gemäß den im Bild 5 dargestellten Umrechnungsformeln für den Ladungs-Übertragungsfaktor T_q ein Wert von $0,15 \text{ pC/m}\cdot\text{s}^{-2}$. Weitere Ausführungsbeispiele für Beschleunigungsaufnehmer sind im Bild 6 dargestellt.

Nun möchte man ja auch bei Beschleunigungsaufnehmern genauso wie bei Messmikrofonen im gesamten Messbereich einen von der Frequenz unabhängigen, d. h. geradlinigen Übertragungs-Frequenzbereich haben. Sorgt man daher dafür, dass das piezoelektrische Wandlerelement schwingungsmäßig hochabgestimmt arbeitet, d. h. „dass seine Eigenfrequenz oberhalb des gewünschten Messbereichs liegt, so arbeitet das System federbestimmt, und die vom Prinzip her vorgegebene Frequenzabhängigkeit hebt sich quasi auf – genauso wie bei hochabgestimmten piezoelektrischen Mikrofonen. Das Bild 7 zeigt das sehr deutlich. Unterhalb der Resonanzspitze verläuft der Frequenzgang geradlinig. In diesem Bild fällt aber noch etwas anderes auf, nämlich, je größer der Aufnehmer ist, umso größer ist sein Übertragungsfaktor und umso tiefer sinkt aber auch seine Resonanzspitze ab.

Das von einem piezoelektrischen Aufnehmer abgegebene elektrische Signal hat einen sehr geringen Energieinhalt. Es handelt sich dabei um elektrische Ladungen von nur wenigen Picocoulomb (pC). Dieses Signal muss daher auf jeden Fall nachverstärkt werden, und zwar von einem nachgeschalteten Vorverstärker. Das kann entweder ein herkömmlicher Spannungsvorverstärker (mit einer Eingangsimpedanz $Z_e \rightarrow \infty$) oder ein Ladungsvorverstärker (mit einer Eingangsimpedanz $Z_e \rightarrow 0$) sein. Beim Spannungsvorverstärker ist die Ausgangsspannung u_a direkt proportional der vom Aufnehmer unmittelbar abgegebenen Signalspannung. Beim Ladungsvorverstärker dagegen ist die Ausgangsspannung u_a direkt proportional der in den Vorverstärker „hineingeflossenen“ Ladungen q .

Hinsichtlich ihrer Funktion unterscheiden sich die beiden Vorverstärker durch den Einfluss bzw. Nichteinfluss der Kabelkapazität C_k auf das Messergebnis, und das kann je nach Kabellänge stark variieren.

Beim Spannungsvorverstärker können Änderungen der Kabellänge zwischen Beschleunigungsaufnehmer und Vorverstärker sowie die damit verbundenen Schwankungen der Kabelkapazität C_k erheblichen Einfluss auf das Messergebnis haben. Beim Ladungsvorverstärker (siehe Bild 8) ist dieser Einfluss vernachlässigbar klein.

Ladungsvorverstärker

Den prinzipiellen Aufbau eines Ladungsvorverstärkers zeigt das Bild 8. Es handelt sich hier um einen kapazitiv rückgekoppelten Differenzver-

Spannungs-Übertragungsfaktor T_u :

$$T_u = \frac{u}{a} \quad \left[\text{Einheit: } \frac{\text{mV}}{\text{m}\cdot\text{s}^{-2}} \right]$$

Ladungs-Übertragungsfaktor T_q :

$$T_q = \frac{q}{a} \quad \left[\text{Einheit: } \frac{\text{pC}}{\text{m}\cdot\text{s}^{-2}} \right]$$

Kapazität des Wandlerelements:

$$C_w = \frac{T_q}{T_u} \quad \left[\text{Einheit: } \frac{\text{pC}}{\text{mV}} = \text{nF} \right]$$

Bild 5: Zusammenhang zwischen dem Spannungs-Übertragungsfaktor, dem Ladungs-Übertragungsfaktor und der elektrischen Kapazität des piezoelektrischen Wandlerelements. Das Symbol „ q “ steht hier für die elektrische Ladung und hat die Einheit Coulomb.

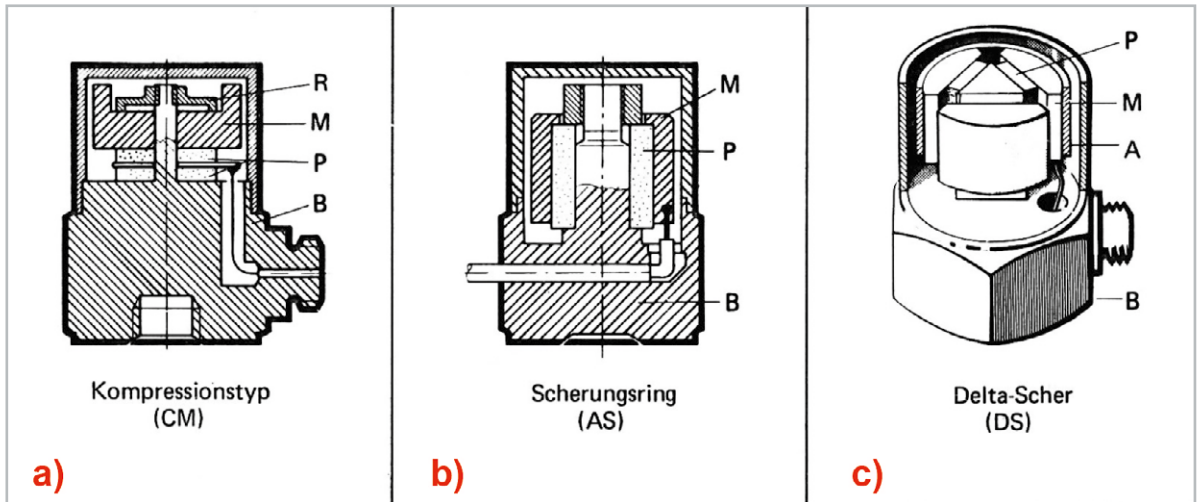


Bild 6: Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer. Gebräuchliche Bauformen: a) Dicken-Schwinger (Kompressionstyp), b) Scherungsring-schwinger (Scher-Aufnehmer), c) Delta-Scher-Aufnehmer
 P: piezoelektrische Scheiben, M: seismische Masse, R: vorgespannte Feder oder A: Spannung, B: Gehäuse mit dickem Boden

stärker. Die am Verstärkerausgang erscheinende Ausgangsspannung u_a ist hier nur von der seitens des Aufnehmers abgegebenen elektrischen Ladung q und der Rückkopplungskapazität C_f abhängig, vorausgesetzt, die Verstärkung V des Differenzverstärkers kann als sehr groß angenommen werden. Auch alle übrigen Kapazitäten bleiben damit ohne Einfluss auf das Messergebnis. Für Messungen mit Beschleunigungsaufnehmern verwendet man daher vornehmlich nur Ladungsvorverstärker. Die am Ausgang des Vorverstärkers erscheinende Signalspannung u_a gelangt über eine Nachverstärkung schließlich zu einem Anzeigeteil am Ende der Messanordnung.

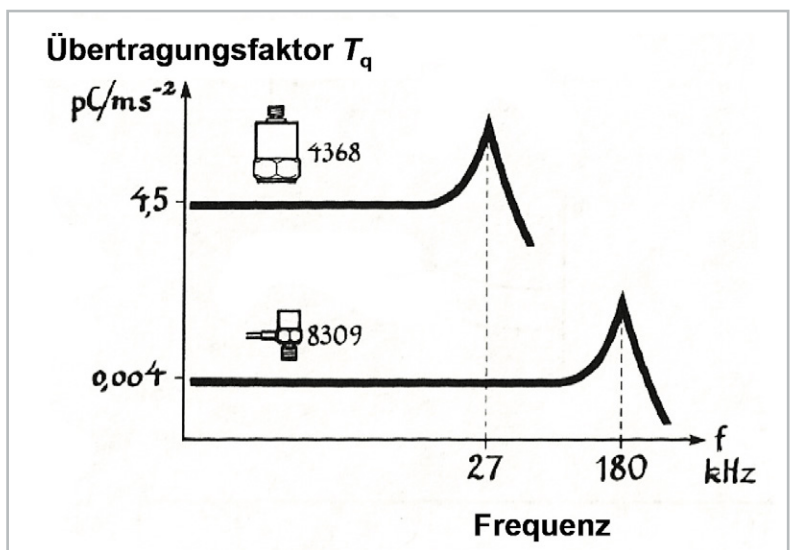


Bild 7: Frequenzgang des Ladungs-Übertragungsfaktors T_q von zwei verschiedenen Beschleunigungsaufnehmern unterschiedlicher Größe (Masse) und Empfindlichkeit. Beide sind hochabgestimmt und haben infolgedessen einen geradlinigen Übertragungsbereich unterhalb ihrer Resonanzfrequenzen.

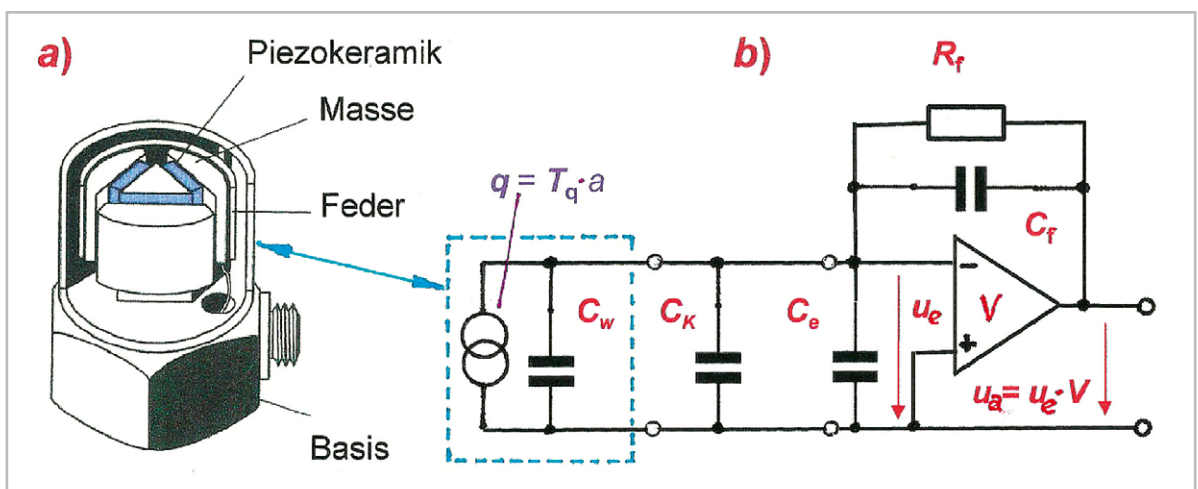


Bild 8: a) Beschleunigungsaufnehmer, hier: Delta-Scher-Element (geöffnet), b) Ladungsvorverstärker, ein kapazitiv rückgekoppelter Differenzverstärker in vereinfachter Prinzipdarstellung. Die Ausgangsspannung $u_a = u_e \cdot V$ ist ein Maß für die vom Aufnehmer abgegebene Ladung q , die ihrerseits ein Maß ist für die gemessene Schwingbeschleunigung.
 C_k = Kabelkapazität (z. B. 135 pF, entsprechend einem 1,5 m langen Kabel)
 C_w = Wandlerkapazität (z. B. 600–1000 pF, je nach Wandlertyp)
 C_e = Verstärkereingangskapazität (z. B. 25 pF)
 C_f = Rückkopplungskapazität
 R_f = Rückkopplungswiderstand

Wie schon zu Beginn dieses Beitrages angemerkt, verfügen die meisten in der Praxis verwendeten Vorverstärker zusätzlich über zwei eingebaute Integrationsstufen, sodass am Ausgang neben dem Beschleunigungssignal wahlweise auch Signale verfügbar sind, die entweder der Schwinggeschwindigkeit v_m oder der Schwingauslenkung x_m entsprechen.

Die praktische Ausführung eines derartigen Ladungsverstärkers (engl.: Charge Amplifier) mit angeschlossenem Beschleunigungsaufnehmer zeigt das Bild 9. Die elektrische Verbindung zwischen beiden besorgt ein dafür gebräuchliches, meist 1,20 m langes Kabel mit Microdot-Steckern an beiden Enden. Auf der Frontseite des Verstärkers erkennt man neben einigen anderen Stellern links unten einen Schaltknopf mit den Einstellmöglichkeiten „Displ.“ für Schwingungsauslenkung, „Vel.“ für Schwinggeschwindigkeit und „Acc.“ für Schwingbeschleunigung, und zwar bei der bereits genannten Integrationseinheit des Ladungsverstärkers.

Neben dem Messverstärker ist eine gute und sichere Befestigung des Aufnehmers am Messobjekt eine sehr wichtige Voraussetzung zur Erzielung eines richtigen und fehlerfreien Messergebnisses. Der Beschleunigungsaufnehmer muss fest (!) mit dem Messobjekt verbunden sein. Wie gut die Ankopplung letztlich ist, erkennt man im Messergebnis, und zwar an der Lage der Resonanzfrequenz. Beträgt diese z. B. 31 kHz, so kann sie bei einer schlechten Befestigung stark absinken, teilweise sogar bis auf 7 kHz (siehe Bild 10). Eine lockere, nur von Hand gehaltene Prüfspitze mit einem



Bild 9: Beschleunigungsaufnehmer und Ladungsverstärker (Typ 2635 Brüel & Kjær) zur Messung von mechanischen Schwingungen, aber auch von Körperschall. Am Umschalter unten links erkennt man sehr deutlich die Schalterstellungen „Acc.“ (Beschleunigung), „Vel.“ (Schwingschnelle) und „Displ.“ (Auslenkung). Der Vorverstärker ist hier über ein 1,20 m langes Kabel und zwei Microdot-Stecker mit dem Vorverstärker verbunden.

Aufnehmer am oberen Ende kann nur zu Orientierungszwecken dienen (siehe Bild 10 d).

In der Praxis bewährte Ankopplungsmöglichkeiten für Accelerometer an Messobjekte bieten feste Schraubverbindungen, z. B. mittels Gewindestift, oder auch Klebverbindungen mithilfe von Bienenwachs. In beiden Fällen sind die Befestigungen nach erfolgter Messung leicht wieder lösbar.

Andere Sensoren zur Schwingungsmessung

Neben reinen Beschleunigungsaufnehmern gibt es noch andere Aufnehmer mit piezoelektrischen Wandlerelementen. Bekannt und in der Praxis oft verwendet sind z. B. Impedanzmessköpfe (Bild 11). Hierbei handelt es sich um Aufnehmer mit zwei Wandler-Systemen. Mit dem einen System kann an einem bestimmten Messort die Schwingbeschleunigung gemessen werden, während mit dem anderen System gleichzeitig auch die Schwingungskraft F am gleichen Ort bestimmt wird. Durch einfache Integration der Beschleunigung erhält man die Schwingschnelle v_m und damit letztlich auch die mechanische Impedanz $Z_m (= F/v_m; \text{Einheit: Ns/m})$ am untersuchten Messort. Der mechanische Anschluss des Aufnehmers hat eine genormte Kontaktfläche von $1,75 \text{ cm}^2$.

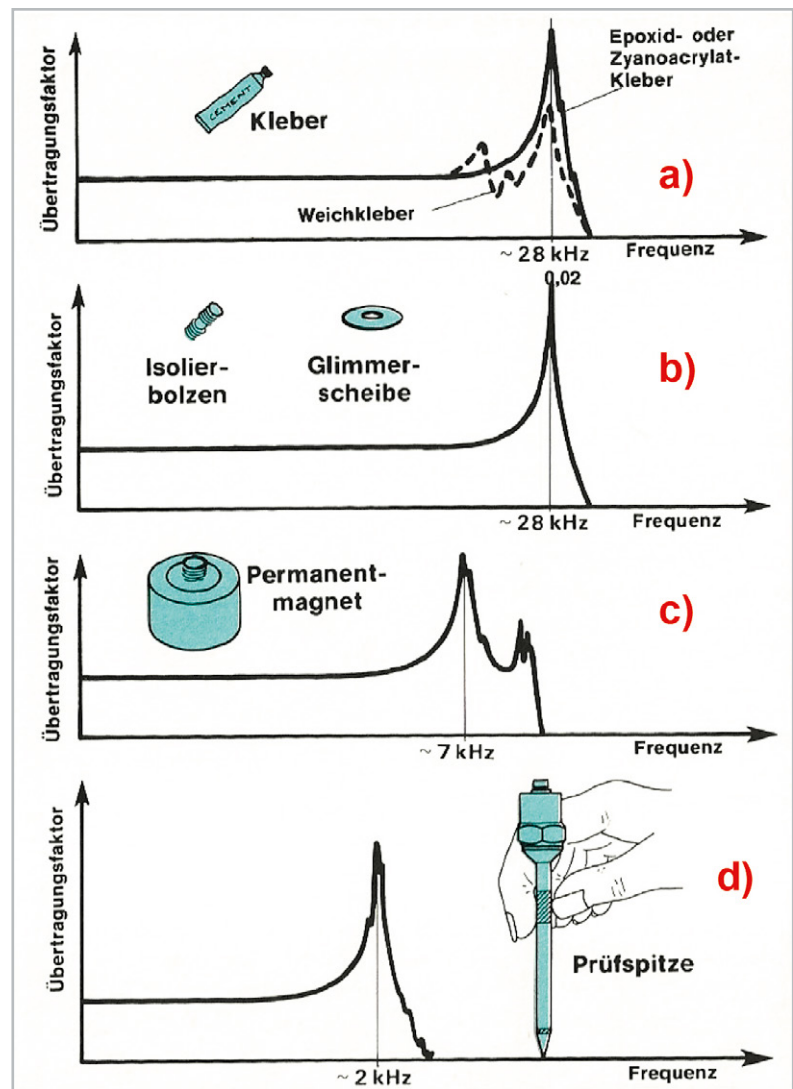
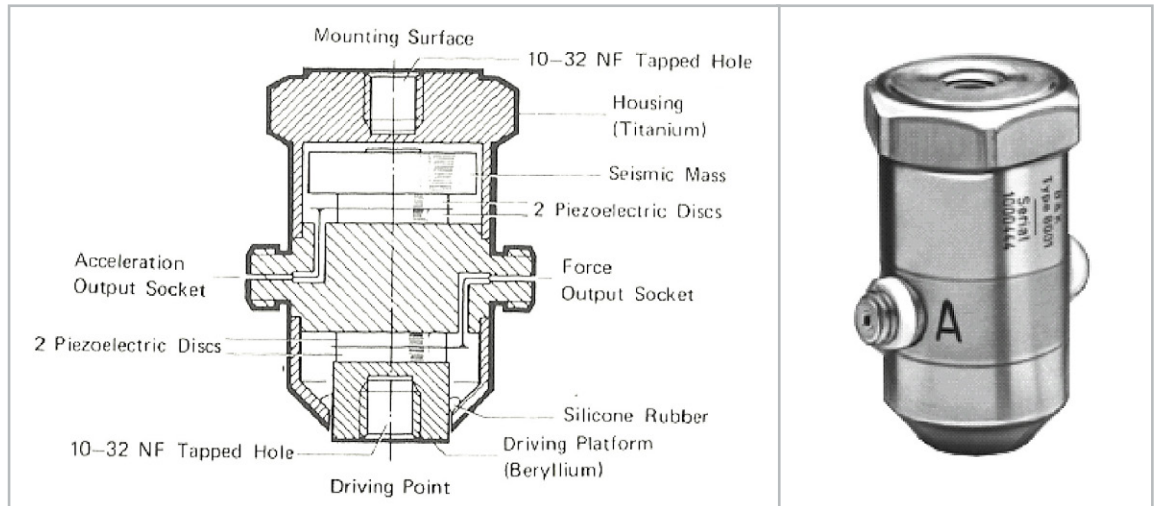


Bild 10: Ankopplung des Beschleunigungsaufnehmers an ein Messobjekt. In den einzelnen Diagrammen ist der Übertragungsfaktor von Beschleunigungsaufnehmern als Funktion der Messfrequenz dargestellt, und zwar für verschiedene Ankopplungsarten des Aufnehmers an des Messobjekt. Bei einer sehr guten und zuverlässigen Ankopplung könnte die Resonanzspitze am oberen Ende des Übertragungsbereichs hier z. B. bei etwa 31 kHz erscheinen. Bei einer nachlässigen Befestigung am Messobjekt sinkt die Resonanzspitze schnell ab: a) Befestigung durch Ankleben, b) Befestigung mittels Isolierschraube und Glimmerscheibe (bei heißen Messobjekten), c) Befestigung mithilfe eines Magneten, d) eine von Hand gehaltene Prüfspitze mit einem Beschleunigungsaufnehmer am Ende für schnelle und orientieren-de Prüfungen, die Ergebnisse können fehlerhaft sein.



Bild 11: Impedanzmessköpfe – Schnittzeichnung und praktische Ausführung



In der Schnittzeichnung des genannten Bildes erkennt man oben den Beschleunigungsaufnehmer zusammen mit der für ihn typischen seismischen Masse, während der darunter befindliche Kraftaufnehmer auf einem starren, aber sehr massearmen Sockel (1 g) aus Beryllium montiert ist. Beide Wandler Systeme haben getrennte Anschlüsse zur Weiterleitung der Messsignale an jeweils einen eigenen Ladungsverstärker.

Ein anderes Messverfahren, das ebenfalls mit piezoelektrischen Wandlern arbeitet, ist die sogenannte Impulshammer-Methode. Sie besteht aus einem Hammer (Bild 12), der mit einem piezoelektrischen Kraftsensor ausgerüstet ist, und des Weiteren aus einem ebenfalls piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer. Der Kraftsensor des Hammers kann mit verschiedenen harten Spitzen (aus Stahl, verschieden hartem Gummi oder diversen Kunststoffen) verbunden werden. Der Sensor misst die Kraft während des Anschlages. Auf diese Weise können zu testende Strukturen mit verschiedenen Frequenzspektren zu mechanischen Schwingungen angeregt werden. Die daraus resultierende Wirkung wird an bestimmten Stellen der zu prüfenden Struktur mit Beschleunigungsaufnehmern gemessen. Aus den so gewonnenen Signalen können unter Zuhilfenahme eines FFT-Analysators die Übertragungseigenschaften der betreffenden Struktur ermittelt werden.

Laser-Doppler-Vibrometer

Dieses Messverfahren arbeitet mit Laserlicht als Messmittel, das auf die Oberfläche eines schwingenden Objekts fokussiert wird. Licht hat den



Bild 12: Impulshammer, der mit verschiedenen harten Spitzen (Stahl, Gummi, Kunststoff) ausgerüstet werden kann. (Foto: Brüel & Kjaer)

außerordentlich großen Vorteil, dass es das zu untersuchende Objekt nicht belastet, es funktioniert somit rückwirkungsfrei.

Das Wort „Doppler“ bezieht sich auf einen Effekt gleichen Namens, der bei diesem Verfahren zur Anwendung kommt. Bei der Betrachtung akustischer Vorgänge geht man im Allgemeinen von ruhenden Schallsendern und/oder ruhenden Schallempfängern aus. Bewegen sich dagegen Sender bzw. Empfänger, so beobachtet man einen Vorgang, der unter der Bezeichnung Dopplereffekt bekannt ist, siehe dazu auch das Bild 13. Ändert sich während der Ausbreitung von Schall der Abstand zwischen Schallsender und Schall-

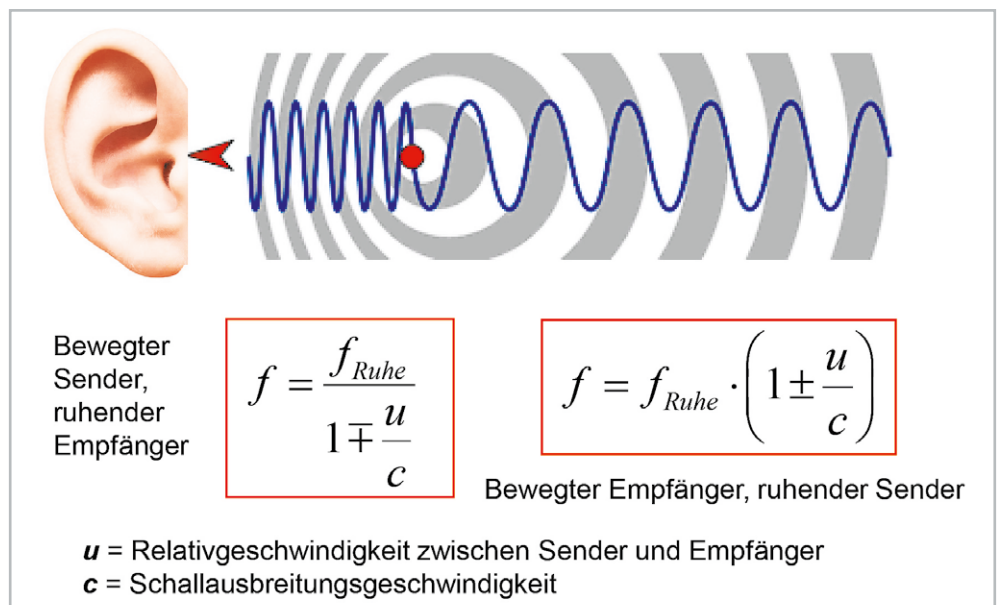


Bild 13: Dopplereffekt: Eine Abstandsverringering während der Schallausbreitung erhöht die vom Empfänger (Beobachter) wahrgenommene Frequenz und umgekehrt. Dieser Effekt ist nach Chr. Doppler benannt, der 1842 einen ähnlichen Effekt in der Astronomie bei der Bewegung von Doppelsternen (Rotverschiebung) nachwies. Bei $u \ll c$ ist es egal, wer sich bewegt, bei $u = c$ ist es nicht mehr egal (Überschallknall!), und bei $u > c$ erreicht der Schall den Empfänger nicht mehr.

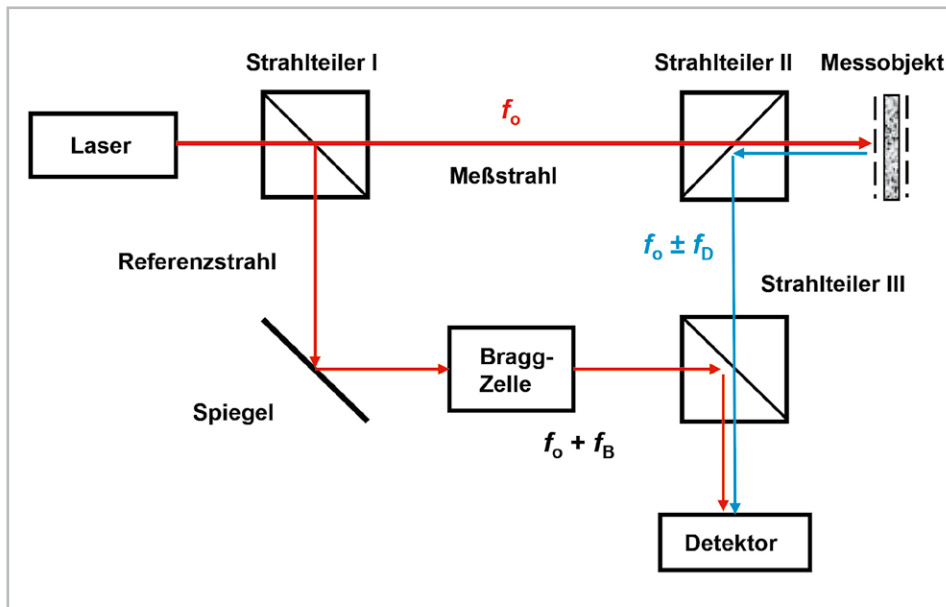


Bild 14: Messprinzip der Laser-Doppler-Vibrometrie. Das vom Laser ausgehende Laserlicht mit einer Frequenz f_0 wird an einem ersten Strahlteiler I aufgeteilt in einen Referenzstrahl und in einen Messstrahl, der auf das schwingende Messobjekt ausgerichtet ist. Das vom Messobjekt zurückgestreute Licht hat eine Frequenz $f_0 \pm f_D$, wobei f_0 die durch den Dopplereffekt bedingte Frequenzerhöhung und -absenkung um f_0 herum darstellt.

empfänger, und zwar fortlaufend, so ändert sich auch die vom Empfänger wahrgenommene Frequenz. Dieser Effekt kommt bei einem Messgerät, einem sogenannten Vibrometer, zur Anwendung, mit dem man mechanische Schwingungen selbst bei extrem kleinen Auslenkungen sehr präzise messen kann.

Das Messprinzip ist im Bild 14 dargestellt. Es handelt sich dabei um ein optisches Messverfahren, mit dem es möglich ist, schwingende Strukturen mit einer extrem hohen Auflösung messtechnisch zu untersuchen, und das auch noch berührungslos! Die Temperatur des Messobjekts spielt dabei keine Rolle, d. h., es können Strukturen auch mit sehr heißer Oberfläche untersucht werden.

Das Verfahren selbst arbeitet mit einem Helium-Neon-Laserstrahl, der an einem ersten Strahlteiler I aufgeteilt wird, und zwar in einen Messstrahl und in einen Referenzstrahl. Der Referenzstrahl wird über einen akusto-optischen Modulator (Bragg-Zelle) direkt zu einem Fotodetektor weitergeleitet. Das Licht des Messstrahls dagegen wird auf ein schwingendes Messobjekt gerichtet, von wo aus es zurückgestreut wird und über zwei weitere Strahlteiler II und III ebenfalls den Detektor erreicht. Im zurückgestreuten Licht stecken Informationen über die Schwinggeschwindigkeit und die Auslenkung der Oberfläche des Messobjekts. Mit anderen Worten: Es enthält Bewegungsinformationen vom Messobjekt. Beide Strahlen, der Referenzstrahl und das vom Messobjekt zurückgestreute Licht, werden auf einem Fotodetektor einander überlagert. Es entsteht dabei eine bewegungsabhängige Modulation des Detektorsignals. Elektronisch werden daraus schließlich die Schwinggeschwindigkeit und die Auslenkung der Oberfläche des Messobjekts ermittelt.

Beispiele für den Einsatz der Laser-Doppler-Vibrometrie gibt es viele, sei es in der Otologie (Ohrenakustik, z. B. bei der Untersuchung der Bewegung des Cortischen Organs), bei der Fehlerdetektion in der Produktion, bei der Prüfung von Kugellagern, bei speziellen Untersuchungen im Bereich von Vibrationen und Körperschall, in der Materialforschung (Auffinden von Materialfehlern) sowie bei der Untersuchung des

Schwingungsverhaltens von Musikinstrumenten u. v. a. Der bekannteste Hersteller derartiger Vibrometer ist die Firma Polytec.

Ausblick

Der nächste Beitrag dieser Serie befasst sich mit dem Thema Wasserschall. In Wasser breitet sich der Schall, genauso wie in Luft, nur als Längs- oder Longitudinalwelle aus. Der „Wellenwiderstand“, oder präziser die Schallkennimpedanz von Wasser, ist allerdings wesentlich höher als diejenige von Luft, und zwar um fast vier Größenordnungen. Das bedeutet, dass die gleiche Schallintensität, die man in Wasser abstrahlt, dort einen um einen Faktor von fast 60 höheren Schalldruck zur Folge hat als in Luft. Mehr noch, der Schalldruckpegel, der in Luft auf die menschliche Hörschwelle bezogen wird, nämlich auf den Wert von $20 \mu\text{Pa}$, bezieht sich bei Wasser per Definition auf einen „glatten“ Wert, nämlich auf $1 \mu\text{Pa}$. Das sind so die besonders markanten Unterschiede zwischen Luft- und Wasserschall. Das hat natürlich vielerlei Konsequenzen, z. B. für die Beschaffenheit der Schallwandler, für die Messtechnik usw.

Dass die Ostsee mit ihrer nicht überragend großen, mittleren Wassertiefe stellenweise an einen akustischen Hallraum erinnert, ist nicht neu. Es gibt aber noch einen sehr gravierenden (!) Unterschied zwischen beiden Medien, und das ist das Phänomen der Kavitation, die gibt es nur in Wasser. Also Stoff genug für die nächste Ausgabe des ELVjournals.



Weitere Infos:

[1] Raum- und Bauakustik, ELVjournal 4/2020: Artikel-Nr. 251424