



Bestrijding van lawaai- en trillingshinder

LES 3 – Trillingshinder

Patrick Guillaume

E-mail: patrick.guillaume@vub.ac.be

Tel.: 02/6293566



Vrije Universiteit Brussel

Faculty of Engineering
Department of Mechanical Engineering
ACOUSTICS & VIBRATION RESEARCH GROUP
Pleinlaan 2 • B-1050 Brussel • Belgium

avrg@vub.ac.be • <http://avrg.vub.ac.be>

Oorzaken van trillingshinder?

1. Bron

- Welke zijn de trillingsbronnen?

2. Transmissiepaden

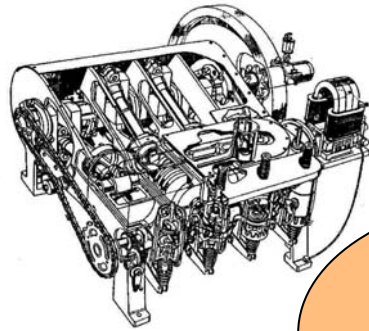
- Hoe worden de trillingen doorgegeven van bron naar ontvanger?
 - Resonanties

3. Ontvanger

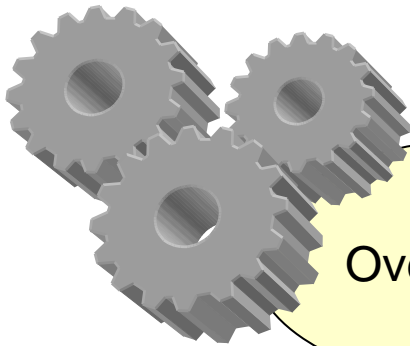
- "Hoeveel" trillingshinder in aanvaardbaar?
 - Normen, Europese richtlijnen, ...
- Wat is het effect van trillingen op het menselijk lichaam?



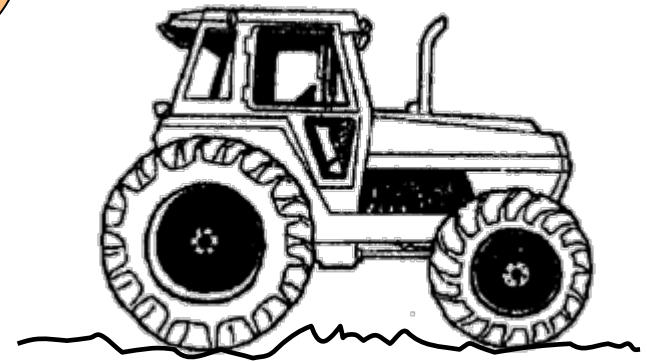
Welke zijn mogelijke trillingsbronnen?



Motoren en
roterende
elementen

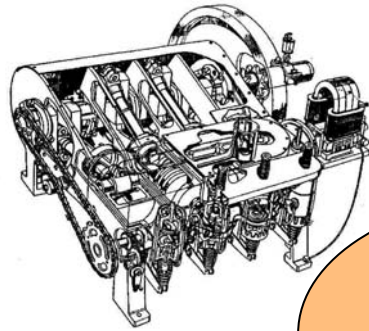


Overbrengingen



Contact tussen
wegdek en band

Welke zijn mogelijke trillingsbronnen?

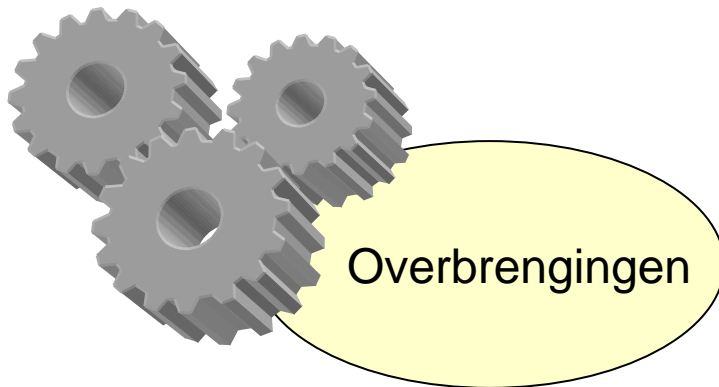


Motoren en
roterende
elementen

Bij motoren en roterende elementen in het algemeen is de onbalans de belangrijkste oorzaak van trillingen.

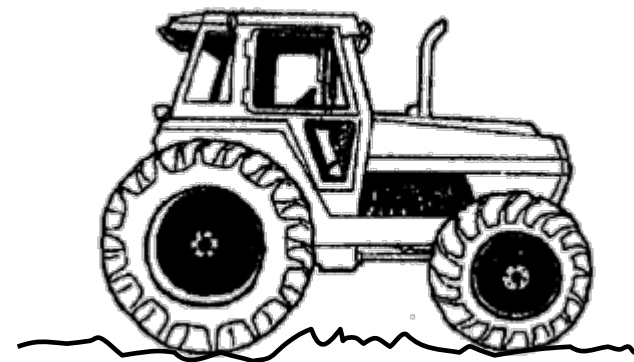
Welke zijn mogelijke trillingsbronnen?

Bij overbrengingen zijn het vaak de slechte smering en de speling tussen de verschillende onderdelen (bvb. door slijtage) die trillingen veroorzaken.



Welke zijn mogelijke trillingsbronnen?

Bij voertuigen is er belangrijke bron van trillingen de interactie van de bewegende wielen met de oneffen ondergrond.



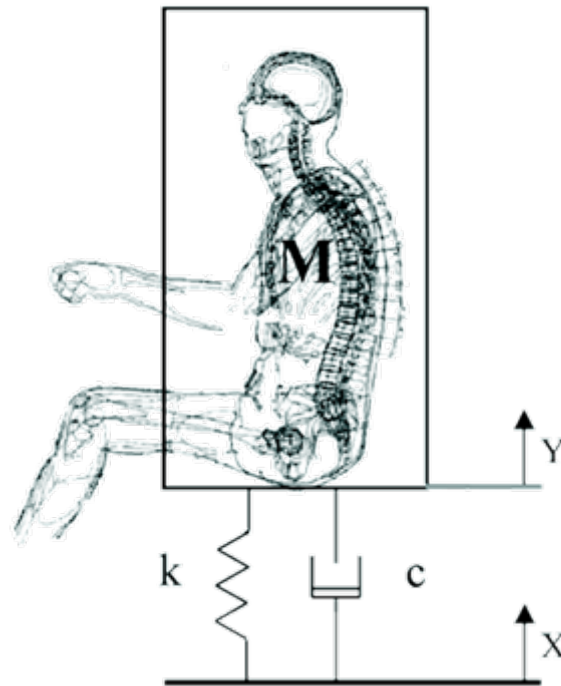
Contact tussen
wegdek en band

Transmissiepaden (resonanties)



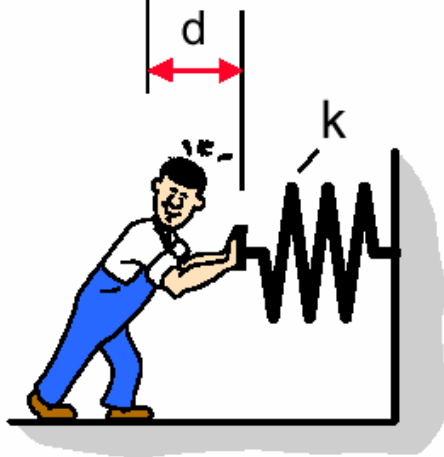
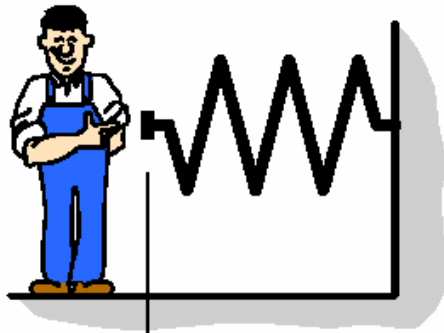
Transmissiepaden (resonanties)

- Waarom bepaalde trillingen moeten vermeden worden heeft veel te maken met het resonantie verschijnsel
- Veel systemen kunnen voorgesteld worden als massa-veer-demper systemen



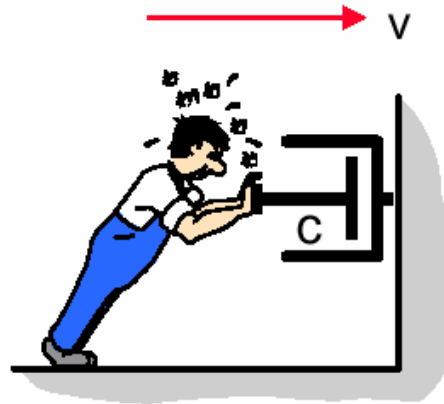
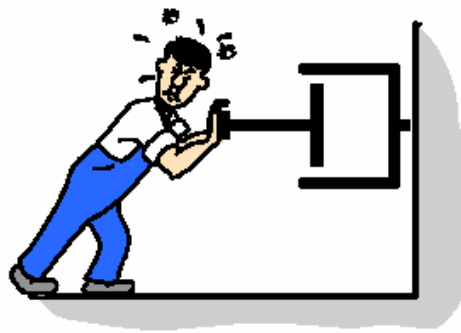
Mechanische parameters

Displacement



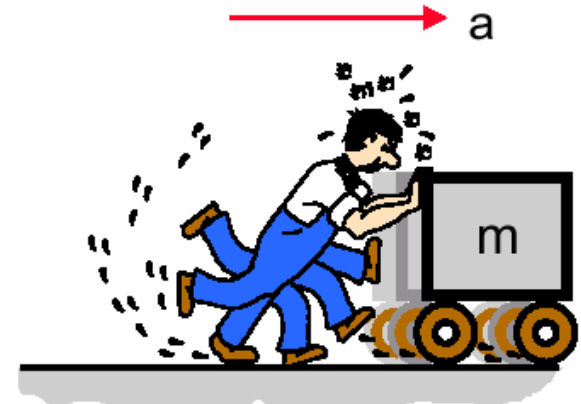
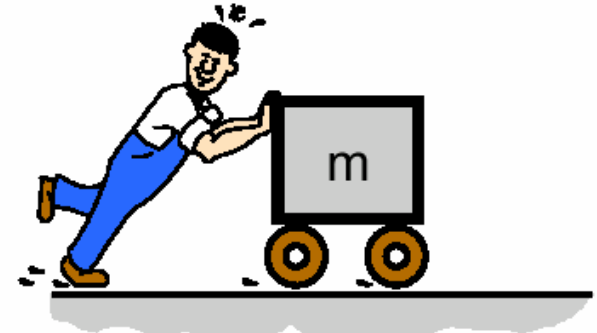
$$F = k \times d$$

Velocity



$$F = c \times v$$

Acceleration



$$F = m \times a$$

Bewegingsvergelijking

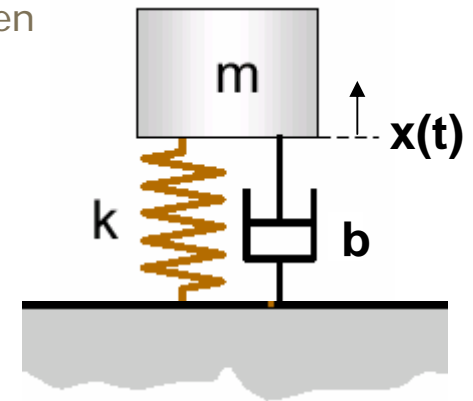
In een bewegingsvergelijking schrijft men het evenwicht tussen traagheidskrachten ($m\ddot{x}$) terugroepkrachten (kx); dempingskrachten ($b\dot{x}$) en excitatiekrachten (F).

Lineair tijdsinvariante systemen (LTI)

- Lineaire differentiaalvergelijking met constante coëfficiënten

In afwezigheid van uitwendige krachten

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0$$



Bewegingsvergelijking – geen demping

Indien men in de eerste benadering de demping verwaarloost, bekomt men

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

Stel $\mathbf{x(t) = X \sin(\omega t)}$ $\ddot{\mathbf{x(t) = -\omega^2 X \sin(\omega t)}$

$$-\omega^2 m \cdot X \sin(\omega t) + k \cdot X \sin(\omega t) = 0$$

$$(-\omega^2 m + k) \cdot X \sin(\omega t) = 0$$

$$-\omega^2 m + k = 0$$

eigenpulsatie

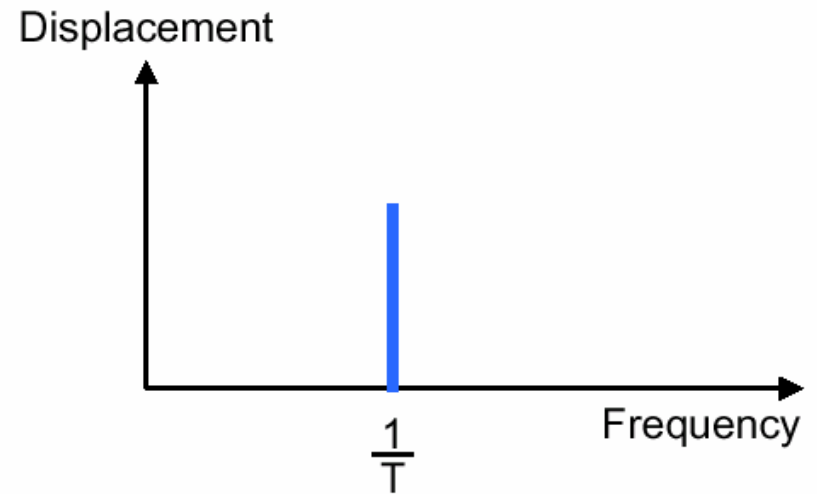
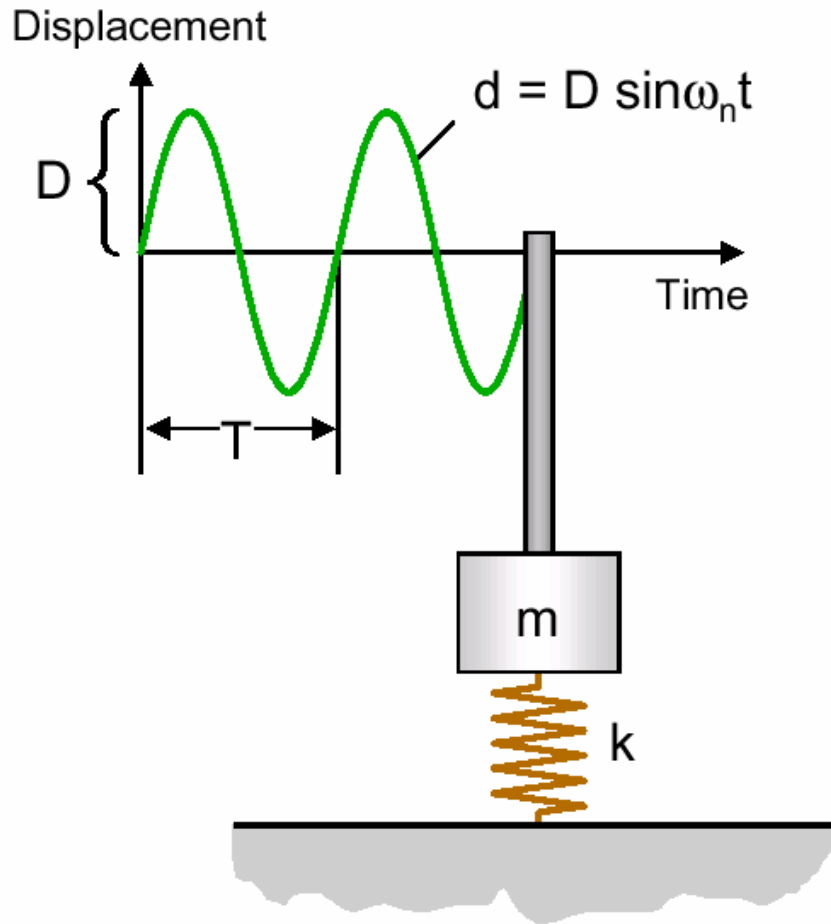
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

eigenfrequentie

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$x = X \sin \omega_n t$$

Vrije beweging bij eigenfrequentie

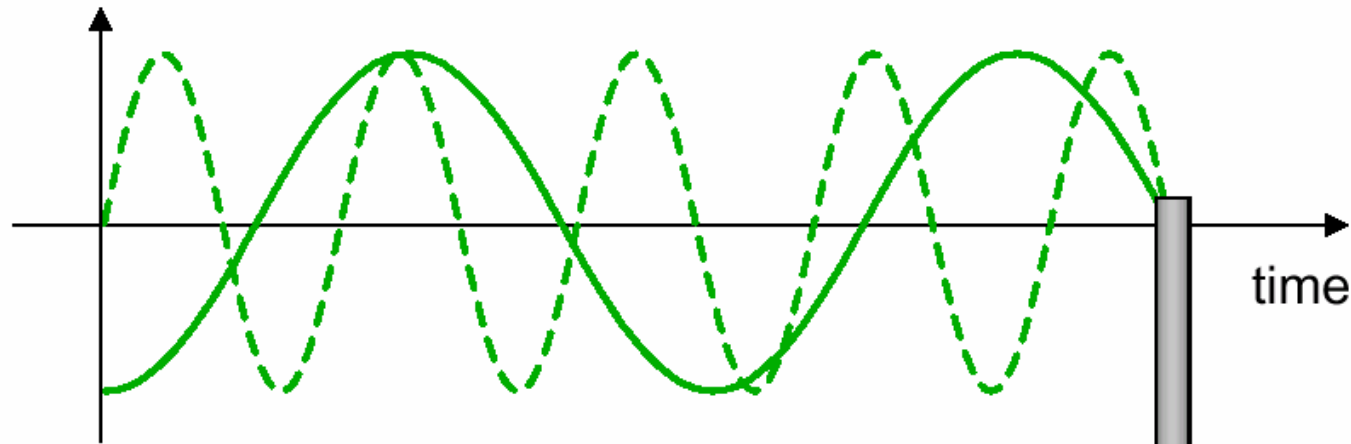


Period, T_n in [sec]

Frequency, $f_n = \frac{1}{T_n}$ in [Hz = 1/sec]

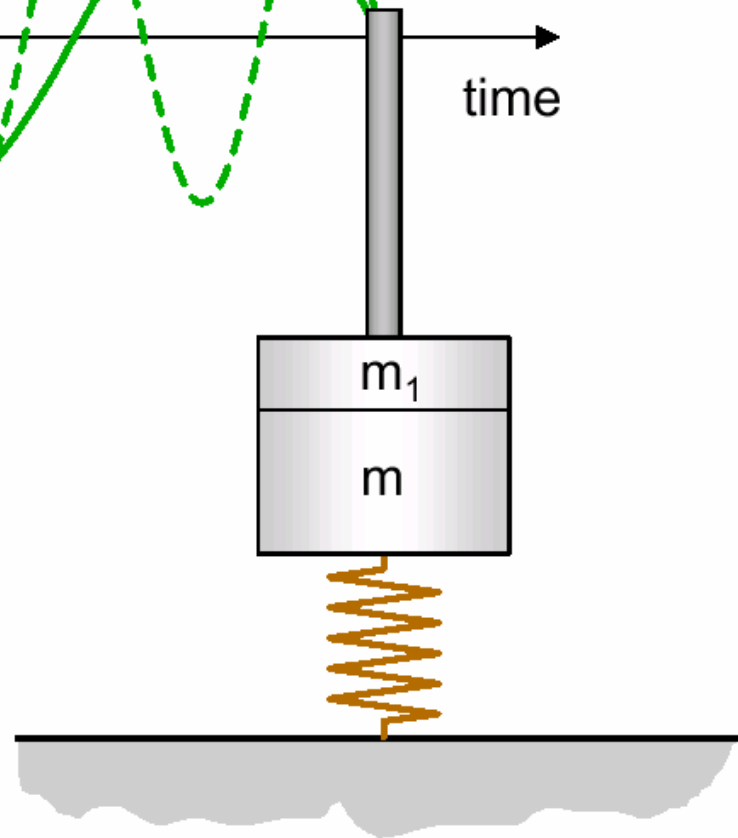
$$\omega_n = 2 \pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Invloed massa en veerconstante



$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m+m_1}}$$

Increasing mass
reduces frequency



Bewegingsvergelijking – met demping

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0$$

$$m\lambda^2 + b\lambda + k = 0$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4mk}}{2m}$$

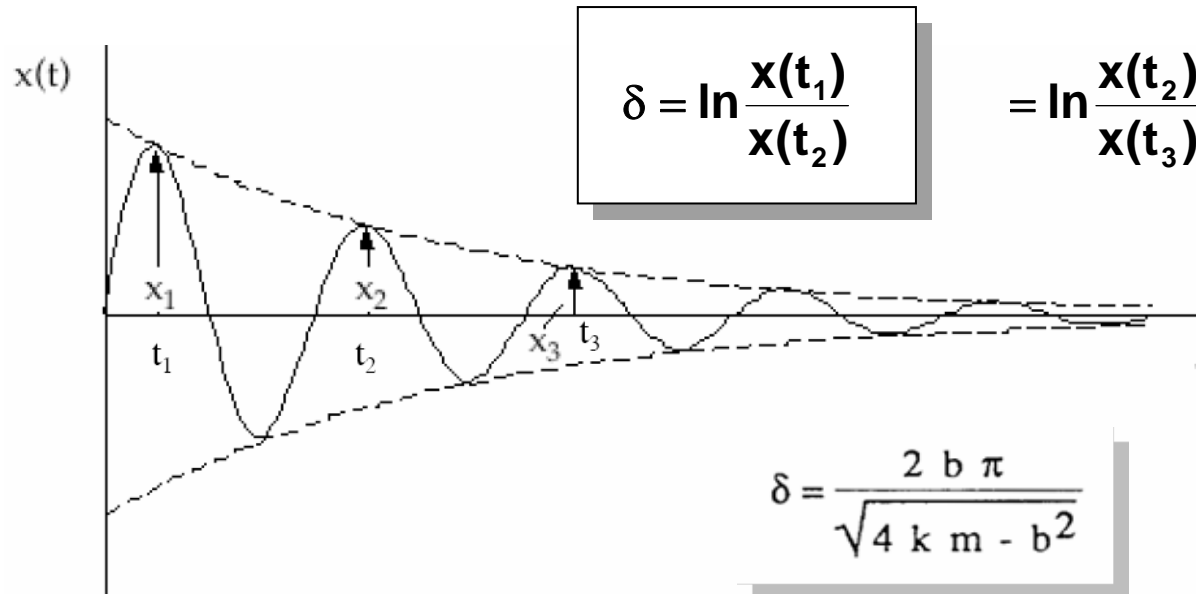
In de praktijk is er echter steeds demping aanwezig. De oplossing is dan afhankelijk van de grootte van de dempingskracht. In het meest voorkomend geval van kleine demping ($b^2 < 4km$) wordt dit :

$$x = X e^{-\frac{b}{2m}t} \sin(\Omega t + \phi)$$

$$\Omega = \sqrt{\omega_n^2 - \frac{b^2}{4m^2}}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{1,2} &= \frac{-b}{2m} \pm i \frac{\sqrt{4mk - b^2}}{2m} \\ &= \frac{-b}{2m} \pm i \sqrt{\omega_n^2 - \frac{b^2}{4m^2}}\end{aligned}$$

Logaritmisch decrement



$$\delta = \ln \left(\frac{e^{-\frac{b}{2m}t_1}}{e^{-\frac{b}{2m}t_2}} \right) = \frac{b}{2m} (t_2 - t_1) = -\text{Re}(\lambda)(t_2 - t_1) \qquad \frac{1}{t_2 - t_1} = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{\text{Im}(\lambda)}{2\pi}$$

Bewegingsvergelijking – gedwongen trilling

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = F_0 \cdot \sin \omega t$$

$$x = X \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

Complexe schrijfwijze

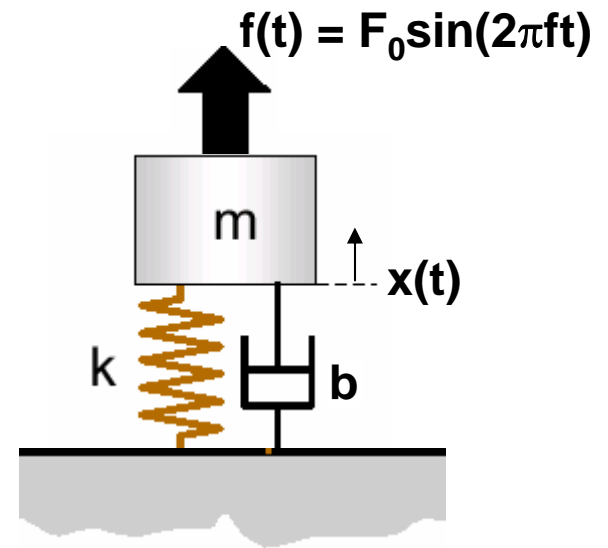
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cdot e^{i\omega t}$$

$$x = X \cdot e^{i(\omega t - \phi)}$$

$$\frac{dx}{dt} = i\omega \cdot X \cdot e^{i(\omega t - \phi)}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot X \cdot e^{i(\omega t - \phi)}$$

$$[-m \cdot \omega^2 + i b \omega + k] X \cdot e^{i(\omega t - \phi)} = F_0 \cdot e^{i\omega t}$$



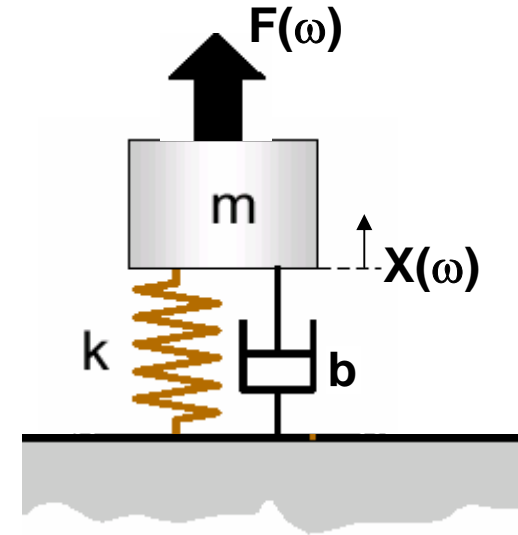
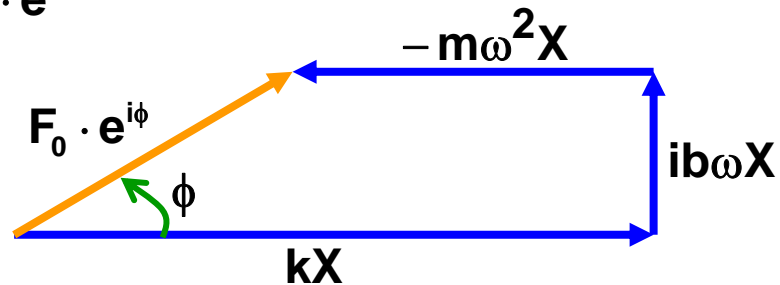
Krachtenvectordiagramma

$$-m\omega^2 X(\omega) + ib\omega X(\omega) + kX(\omega) = F(\omega)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} F(\omega) = F_0 \cdot e^{i\omega t} \\ X(\omega) = X \cdot e^{i(\omega t - \phi)} \end{cases}$$

$$[-m \cdot \omega^2 + i b \omega + k] X \cdot e^{i(\omega t - \phi)} = F_0 \cdot e^{i\omega t}$$

$$\Rightarrow -m\omega^2 X + ib\omega X + kX = F_0 \cdot e^{i\phi}$$



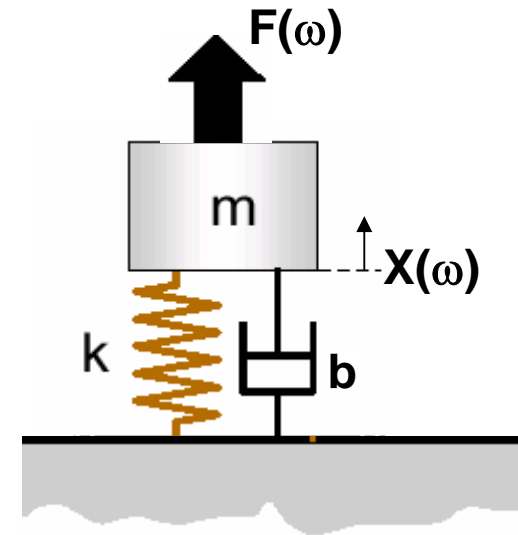
Frequentieresponsfunctie (FRF)

$$(-m \cdot \omega^2 + i b \omega + k) \cdot X \cdot e^{-i\phi} = F_0$$

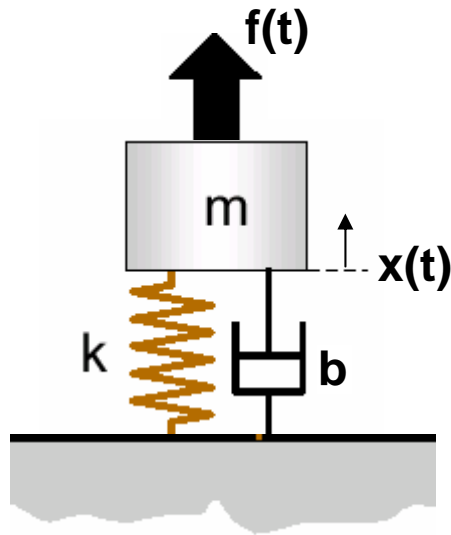
$$X \cdot e^{-i\phi} = \frac{F_0}{(k - m\omega^2) + i b \omega}$$

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{X e^{-i\phi}}{F_0} = \frac{1}{(k - m \omega^2) + i b \omega}$$

$$\text{met } \begin{cases} F(\omega) = F_0 \cdot e^{i\omega t} \\ X(\omega) = X \cdot e^{i(\omega t - \phi)} \end{cases}$$



Overzicht systeem met 1 V.G.



Tijdsdomein

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) = f(t)$$

Frequentiedomein (Laplace)

$$ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s) = F(s)$$

$$\Rightarrow \underbrace{(ms^2 + bs + k)}_{Z(s)} X(s) = F(s)$$

- Dynamische stijfheid $Z(s) \Leftrightarrow$ (statische) stijfheid k

Transferfunctie

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k}$$

Frequentie-Respons-Functie (FRF)

$$H(\omega) = \frac{1}{m(i\omega)^2 + b i\omega + k} = \frac{1}{(k - m\omega^2) + i b \omega}$$

Overzicht systeem met 1 V.G.

Systeempolen

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k}$$

– **Poles :** $ms^2 + bs + k = 0$

$$s_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4mk}}{2m}$$

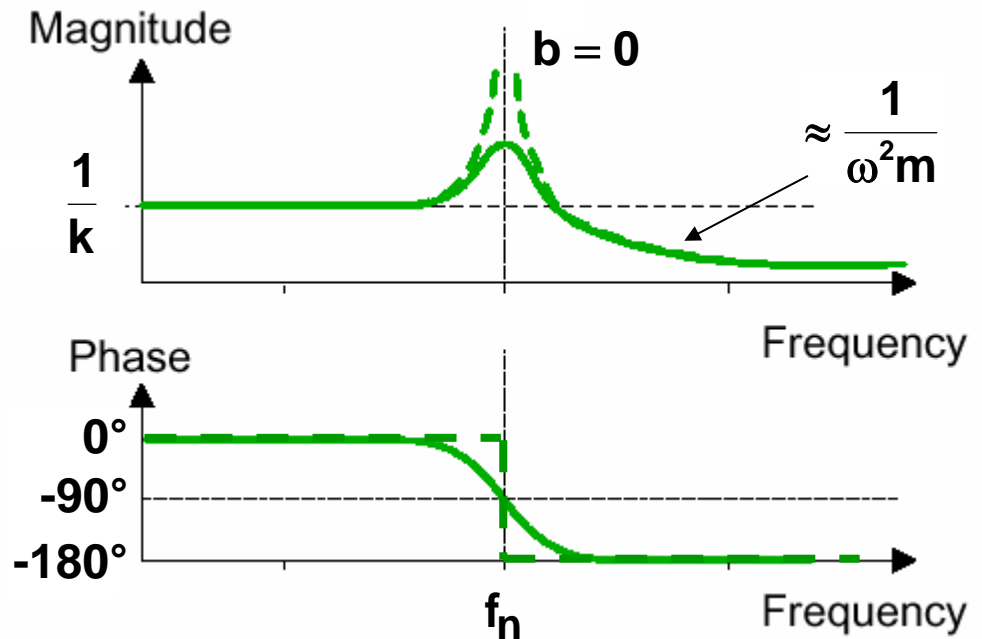
$$b_c = 2\sqrt{mk}$$

– **if $b < b_c$** $s_{1,2} = -\sigma \pm i\omega_d$ ($\omega_d = \Omega$)

– **if $b = 0$** $s_{1,2} = \frac{-0 \pm \sqrt{0 - 4mk}}{2m} = \pm \sqrt{\frac{k}{m}}$

Frequency Response Function (FRF)

$$H(\omega) = \frac{1}{(k - m \omega^2) + i b \omega}$$

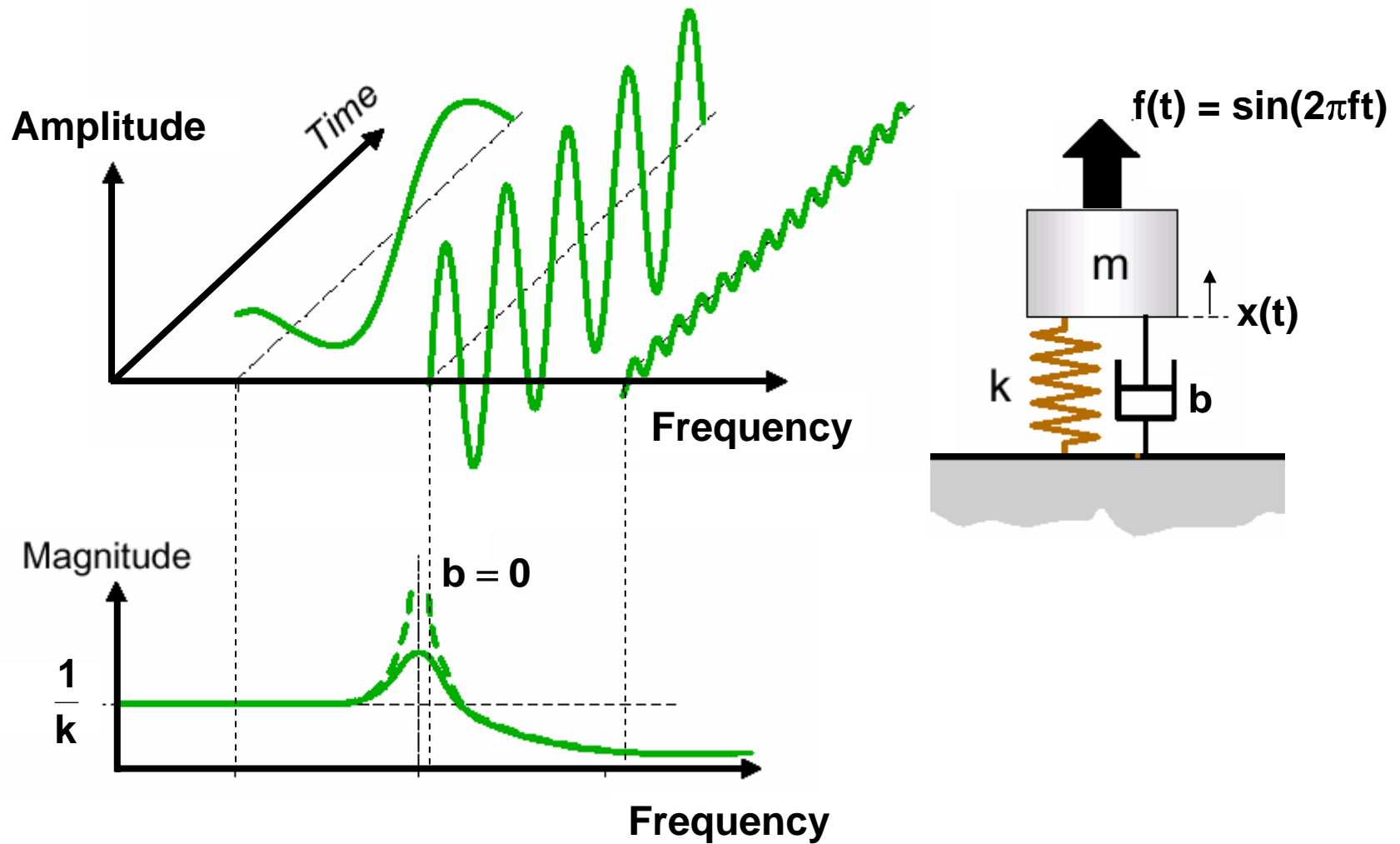


Natural (eigen) frequency

for $b = 0 \Rightarrow H(\omega) = \infty$ when $\omega = \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

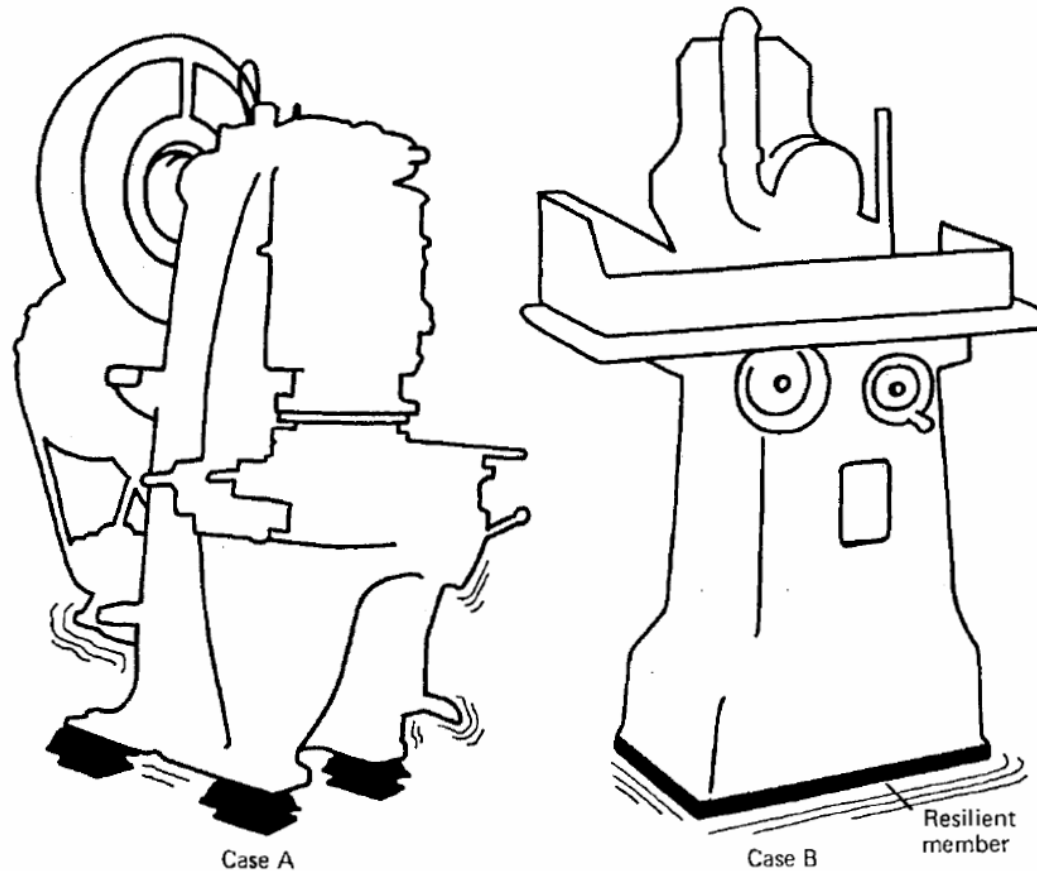
$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Physical Interpretation for Harmonic Excitation



Trillingsisolatie

Isolatie van de omgeving t.o.v. een trillende machine
Isolatie van een machine t.o.v. trillende omgeving



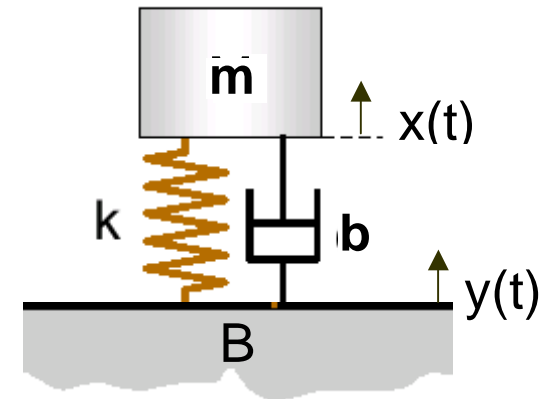
Trillingsisolatie

Isolatie van een machine t.o.v. trillende omgeving

$$m\ddot{x}(t) = k(y(t) - x(t)) + b(\dot{y}(t) - \dot{x}(t))$$

$$-m\omega^2 X(\omega) = (k + i\omega \cdot b)(Y(\omega) - X(\omega))$$

$$X(\omega) = \frac{k + i\omega \cdot b}{(k - m\omega^2) + i\omega \cdot b} Y(\omega)$$

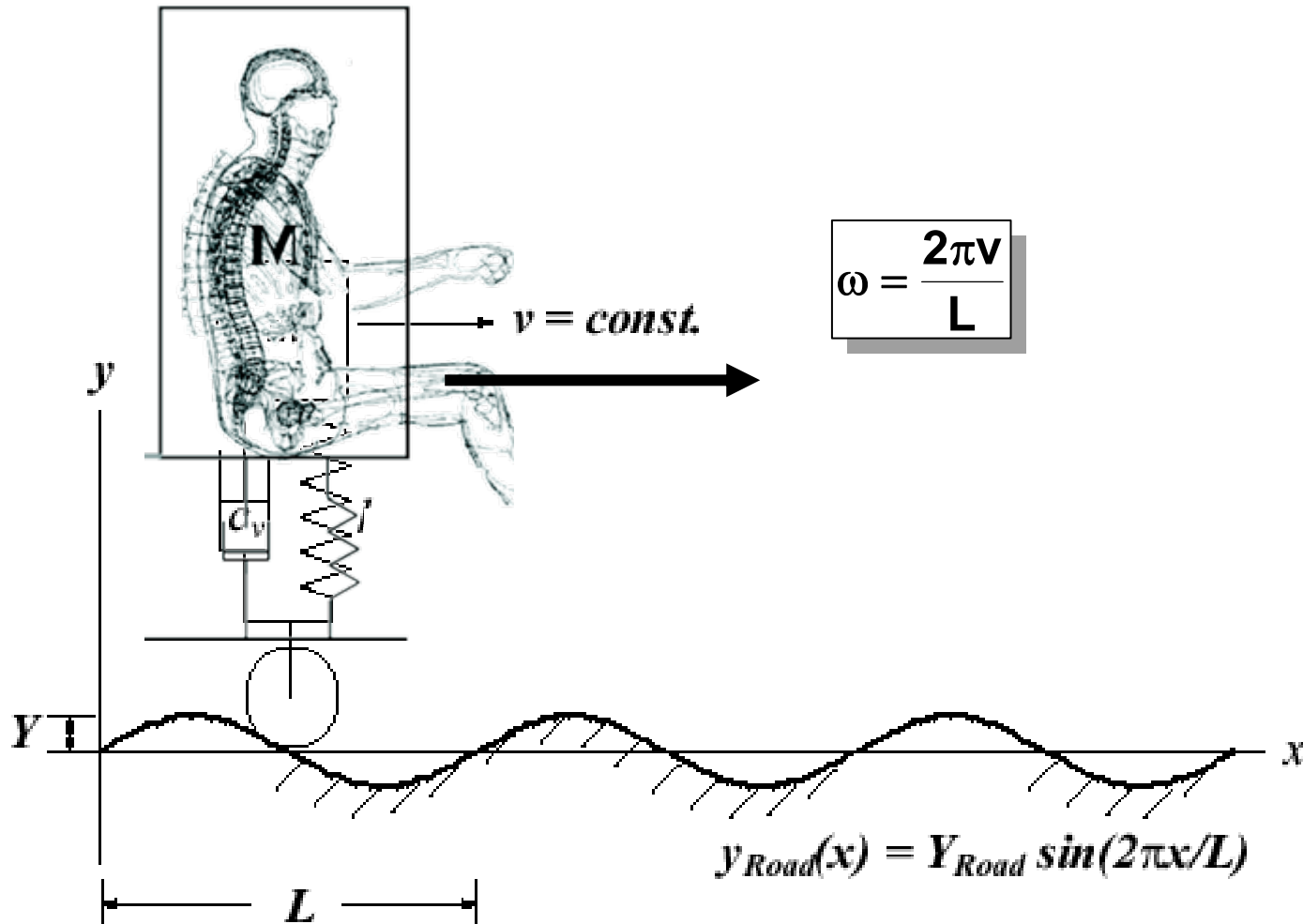


$$X(\omega) = \frac{1 + i \cdot 2\alpha \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + i \cdot 2\alpha \frac{\omega}{\omega_n}} Y(\omega)$$

$$\alpha = \frac{b}{b_c} = \frac{b}{2\sqrt{mk}}$$

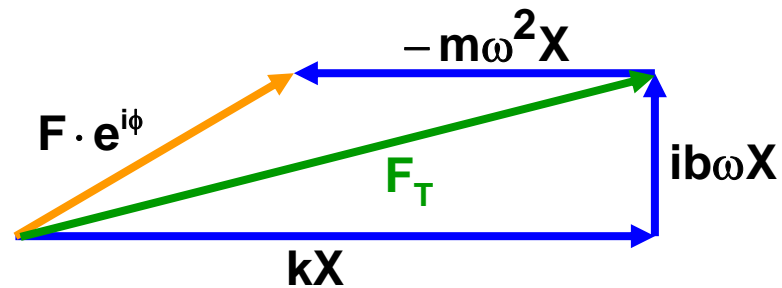
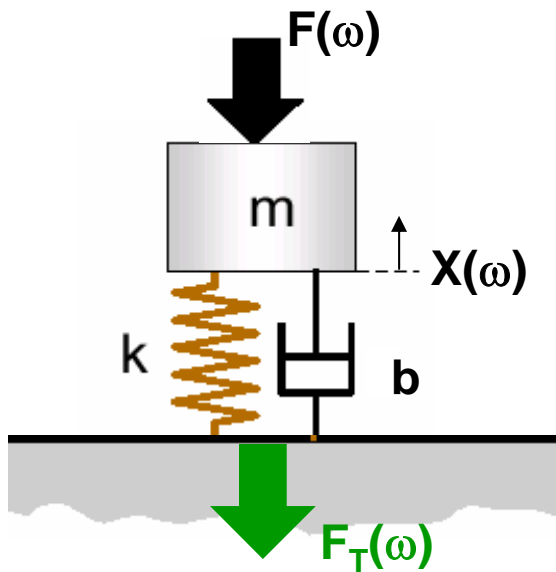
Trillingsisolatie

Trillingsisolatie van voertuigen (bvb. vrachtwagens)



Trillingsisolatie

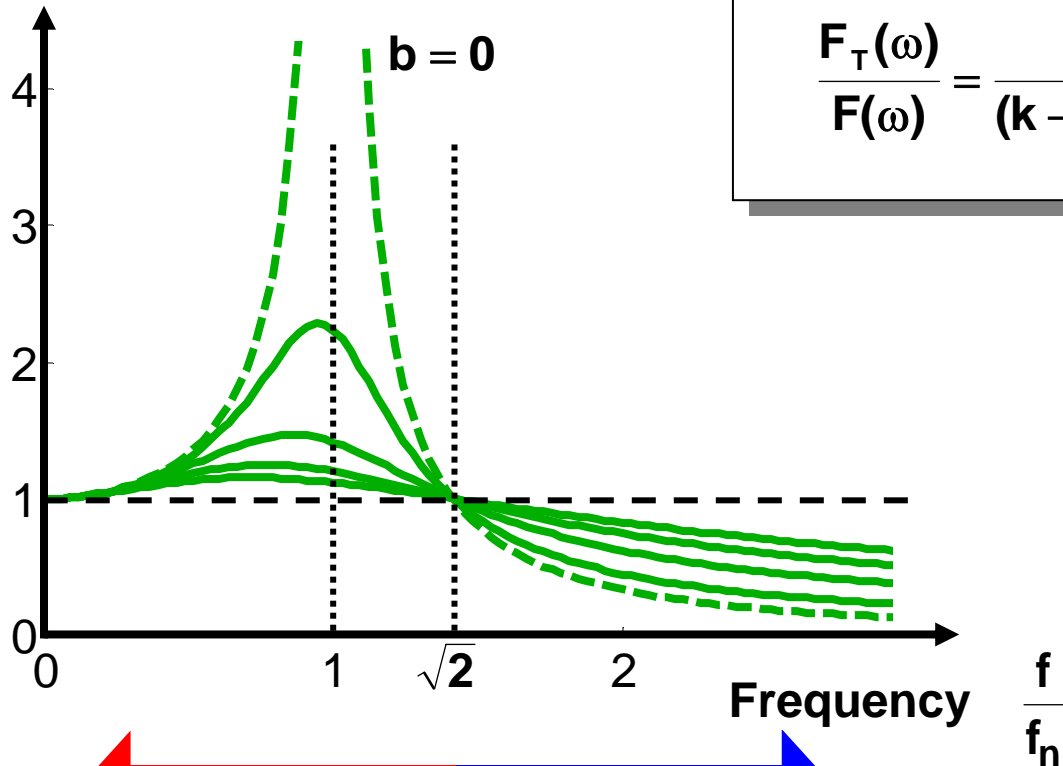
Isolatie van de omgeving t.o.v. een trillende machine



$$\frac{F_T(\omega)}{F(\omega)} = \frac{k + i b \omega}{(k - m \omega^2) + i b \omega}$$

Transmissibiliteit

Magnitude



$$\frac{F_T(\omega)}{F(\omega)} = \frac{k + i b \omega}{(k - m \omega^2) + i b \omega}$$

Procedure

Bepaling van de stoorfrequentie

- TPM van machine
- Spectrale analyse

Bepaling van de gewenste dempingsgraad

- Meestal tussen 80% en 95%

Bepaling van de statische veerweg

Bepaling van de belasting per trillingsdemper

Keuze van de trillingsdemper

Voorbeeld

1. Een ventilator met elektromotor weegt totaal 180 kg en wordt direct aangedreven met een toerental van 1450 tpm.

Het geheel is gemonteerd op een stalen frame van 60 kg.

Tussen het frame en de vloer moeten 4 trillingsdempers worden aangebracht. Kies deze zodanig dat de dempingsgraad minstens 90 % is.

Men bepaalt hier allereerst de excitatiefrequentie, welke gelijk is aan 1450 tpm of 24.2 Hz. De kennis van de gewenste dempingsgraad laat ons toe om de statische veerweg te bepalen door middel van **figuur 4.16**.

Men vindt als statische veerweg 6 mm. Het totaal gewicht van de groep bedraagt :

$$180 + 60 = 240 \text{ kg.}$$

Dit wordt gelijkmatig verdeeld over 4 trillingsdempers.

Per trillingsdemper is de belasting dan :

$$240/4 = 60 \text{ kg} = 600 \text{ N.}$$

Gebruikmakend van de veer karakteristieken voorgesteld in **figuur 4.20** (de belasting is weergegeven in daN!) kan men de geschikte demper kiezen.

De aangewezen demper is type MST 101 met als hardheid A. [5].

De toegestane belasting van dit type demper is 75 kg, zodat deze trillingsdemper een kleine veiligheid bezit tegenover schokken.

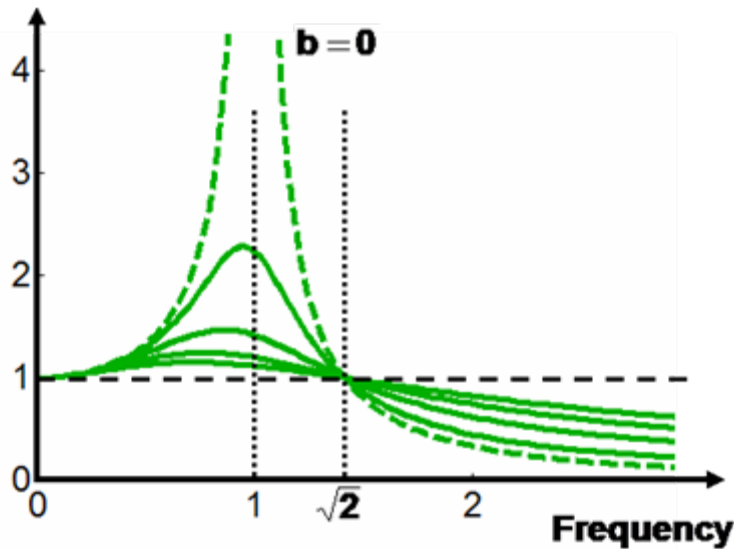
Voorbeeld

Statische veerweg

- Dempingsgraad 90%
- Transmissibiliteit 10%

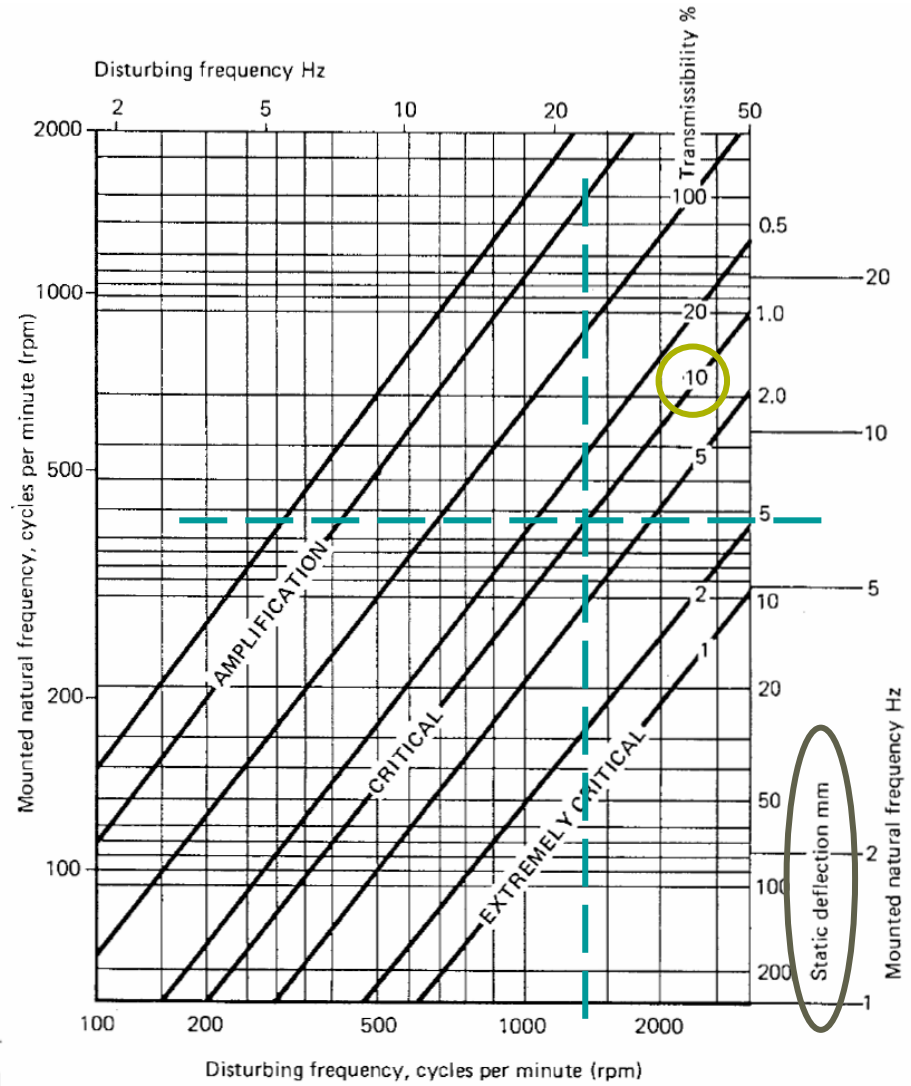
$$f_h = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{g}{\Delta} \right)^{1/2}$$

Magnitude



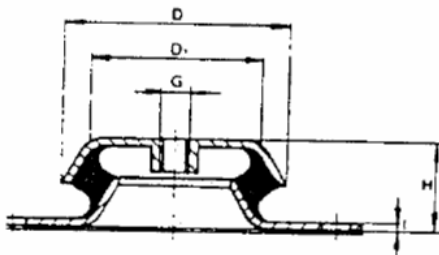
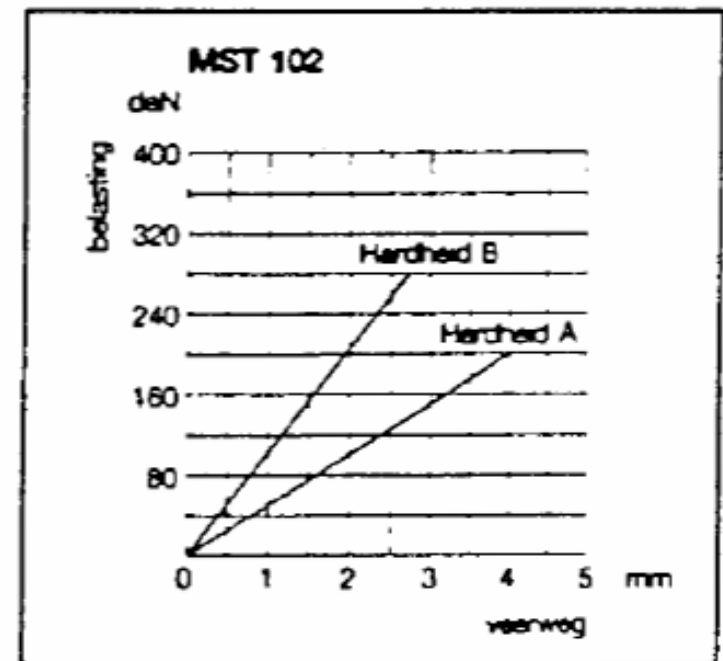
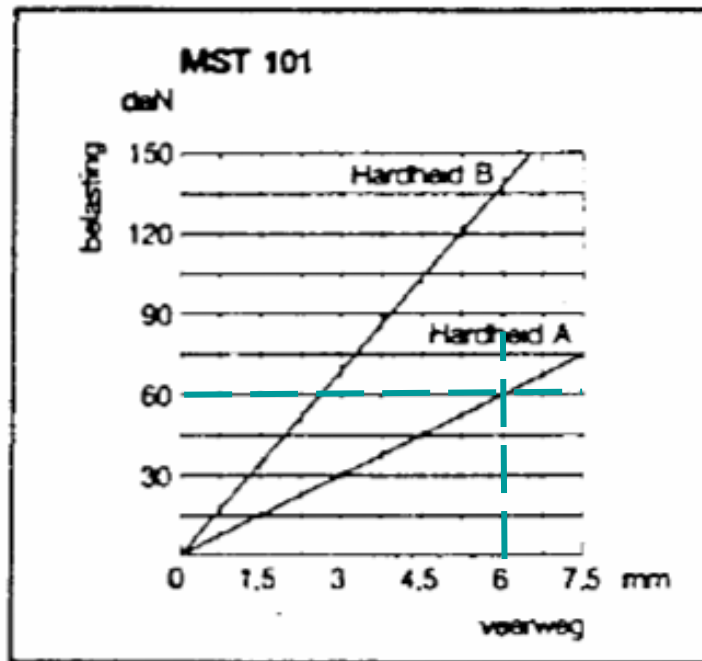
Amplification

Attenuation

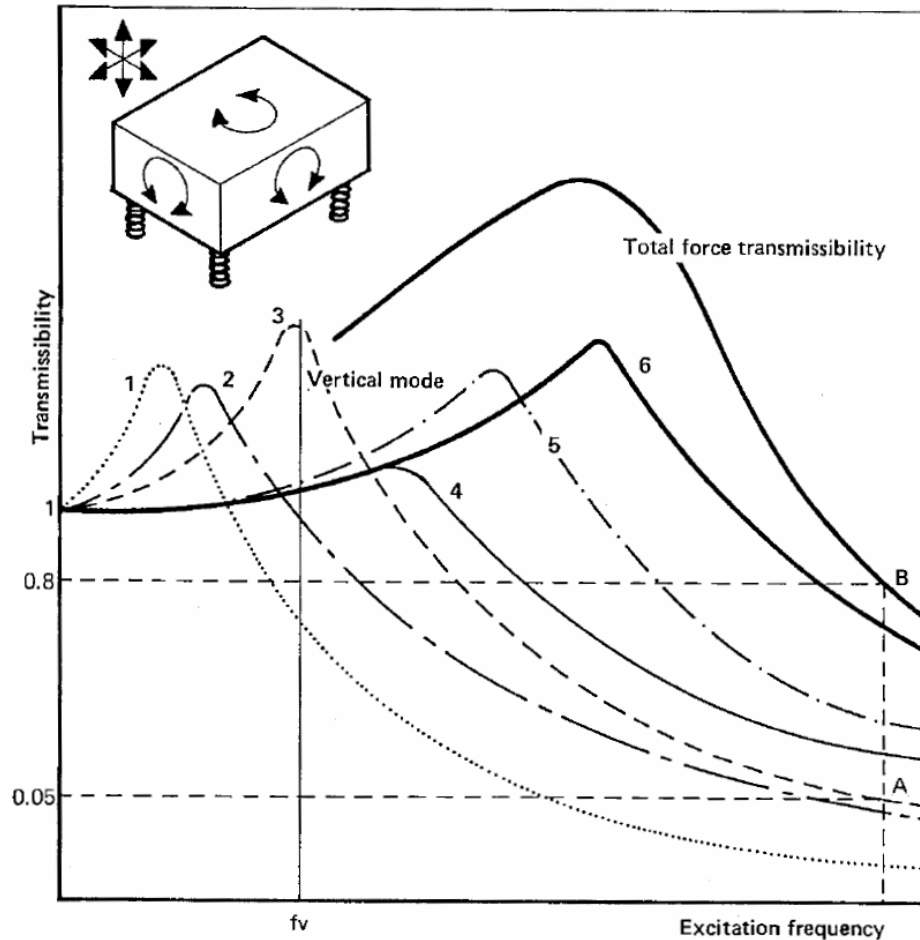


Voorbeeld

Keuze van de trillingsdempers



Invloed van andere vrijheidsgraden

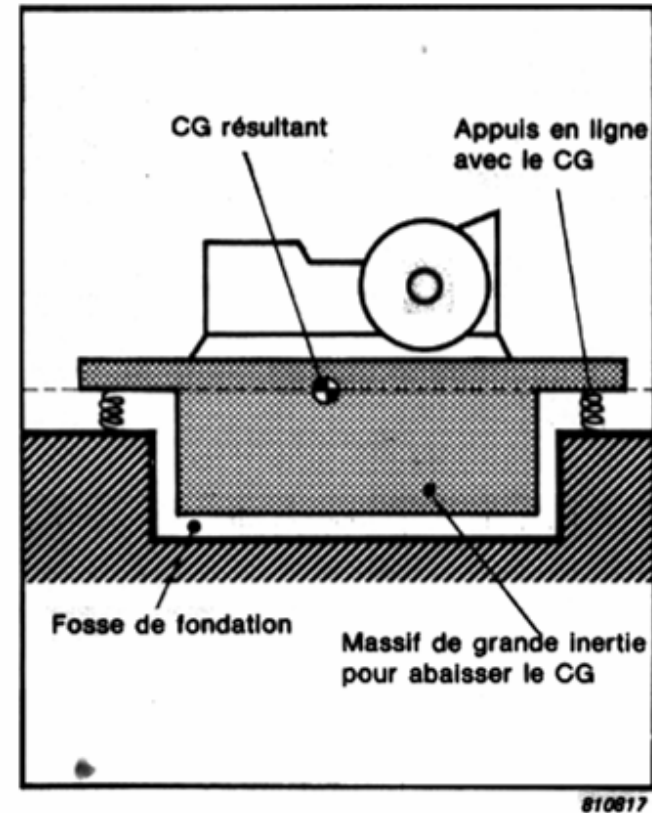
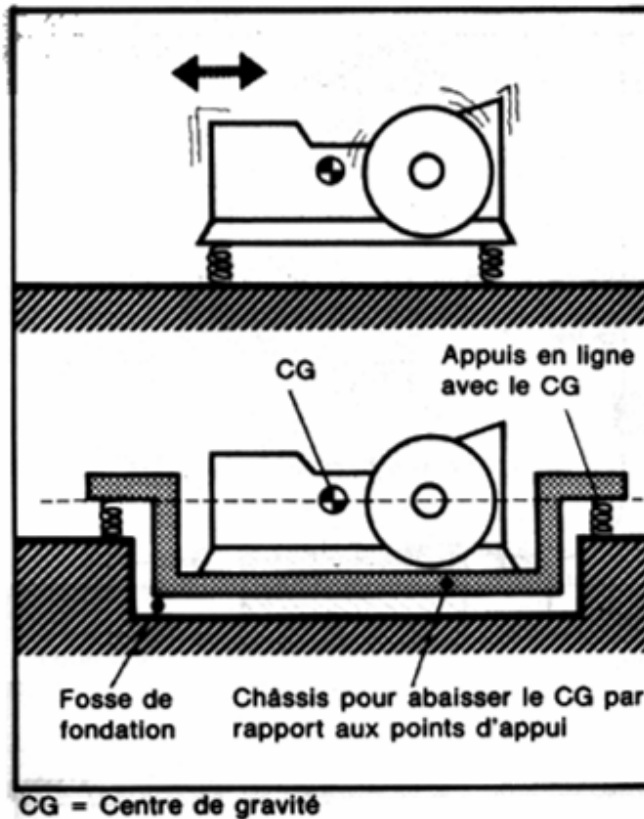


f_v = Natural frequency of vertical mode alone

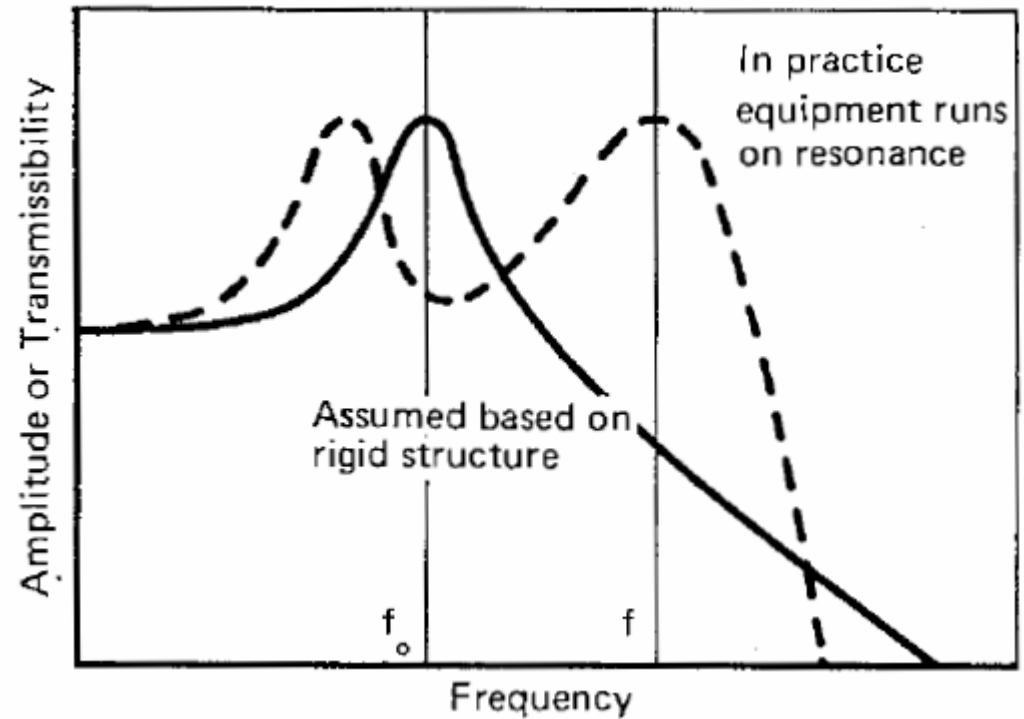
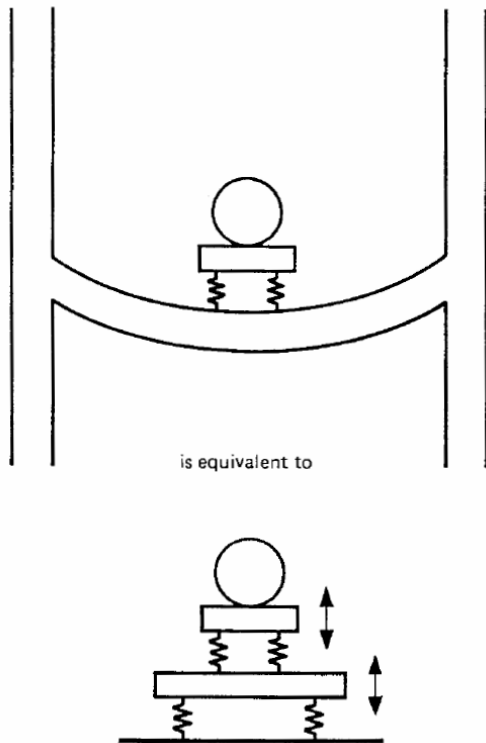
A = Expected transmissibility 5% from pure vertical motion

B = Actual transmissibility 80% from the combined coupled motions

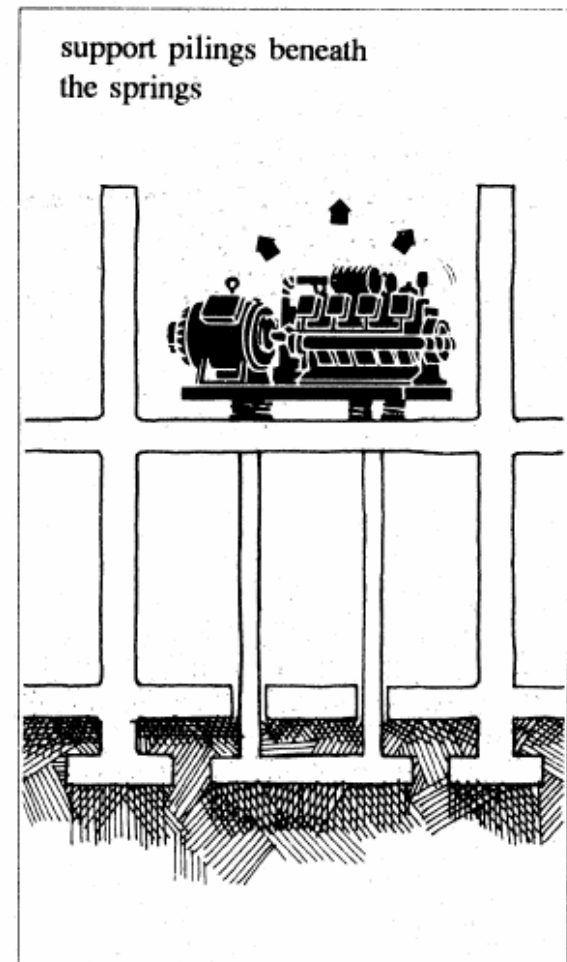
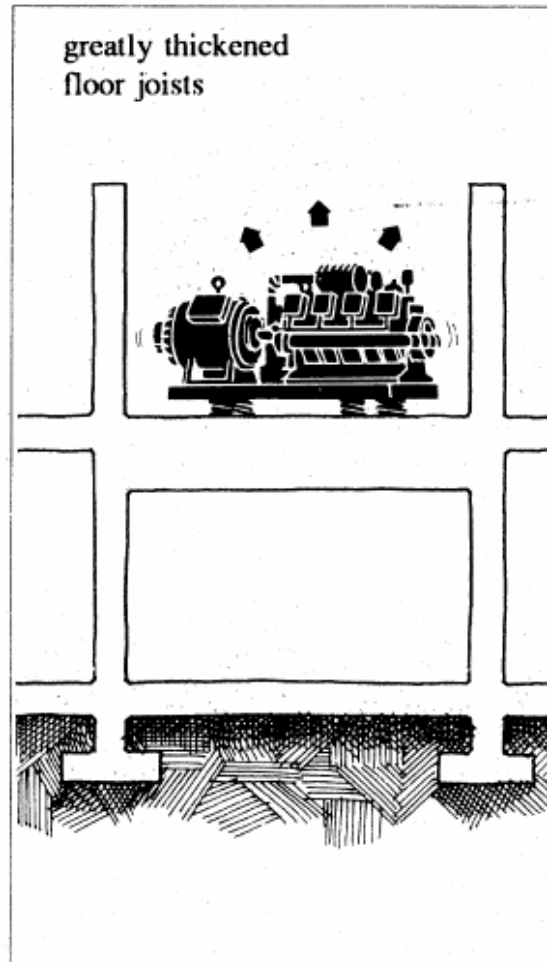
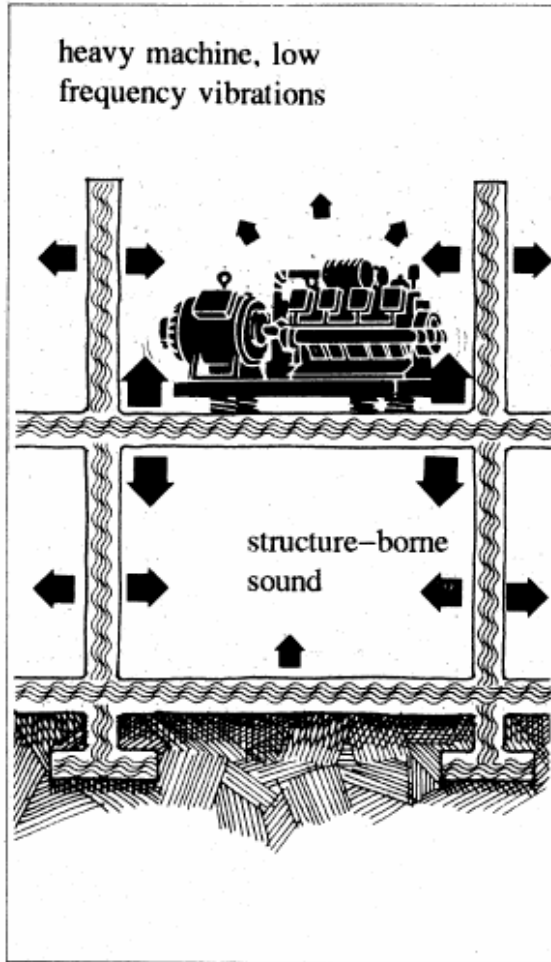
Invloed van andere vrijheidsgraden



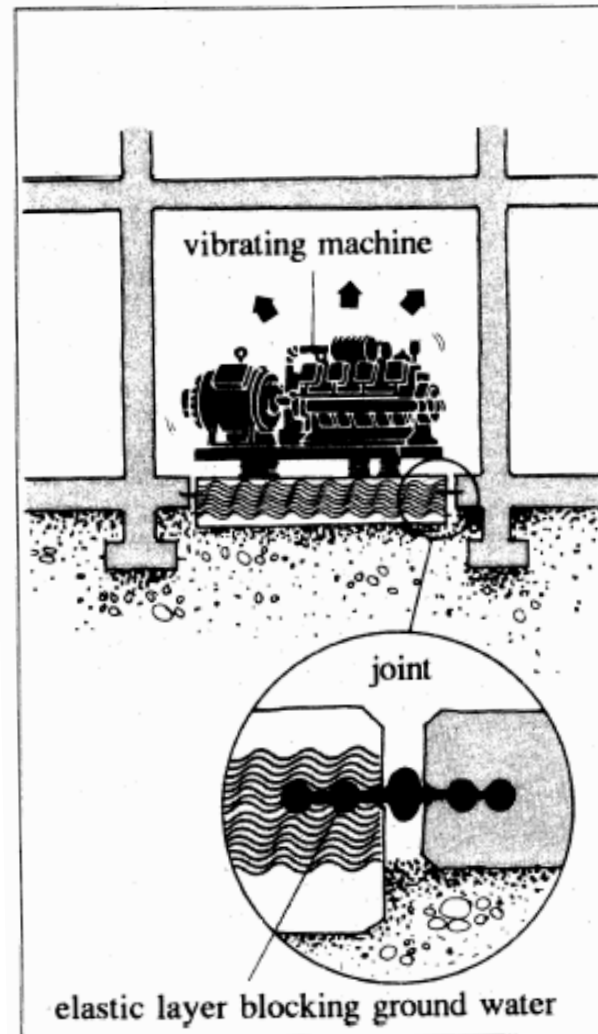
Invloed van de elasticiteit van de fundering



Invloed van de elasticiteit van de fundering



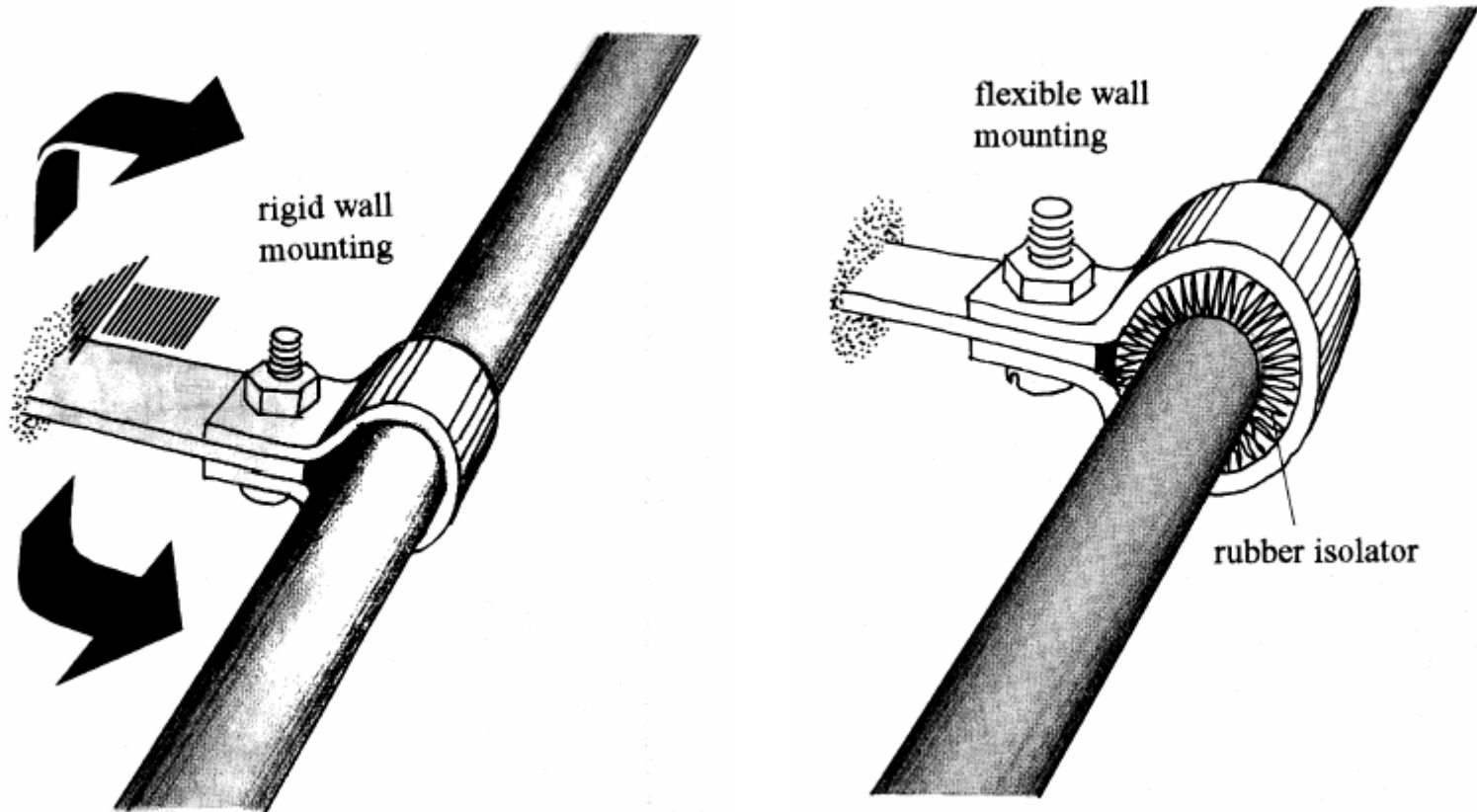
Invloed van de elasticiteit van de fundering



Toepassingen

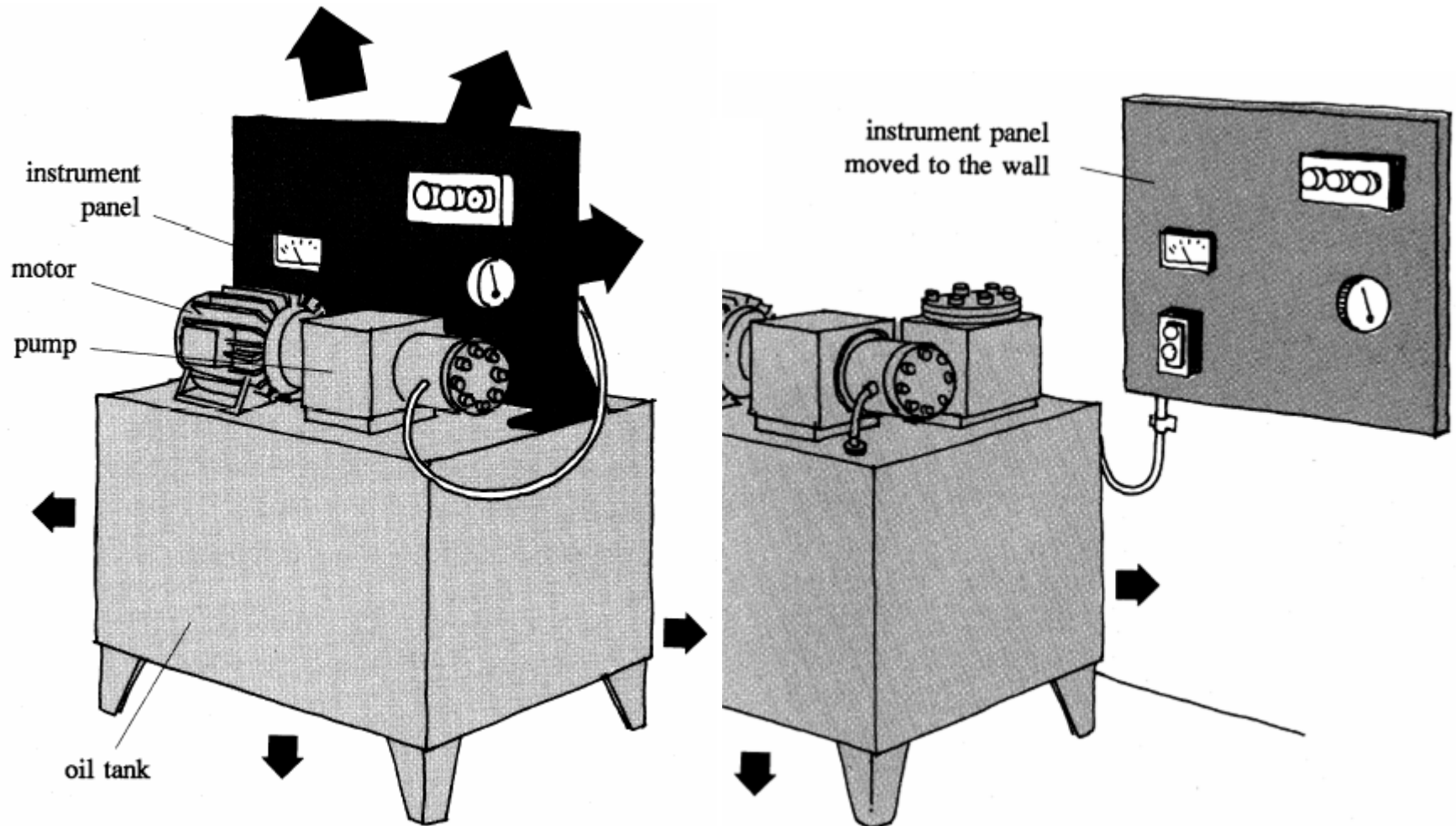
Trillingsisolatie toegepast op leidingen

- Hydraulische leidingen

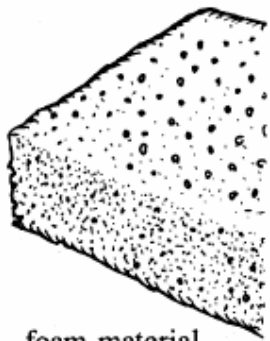


Toepassingen

Hydraulische groep (instrumentenpaneel)



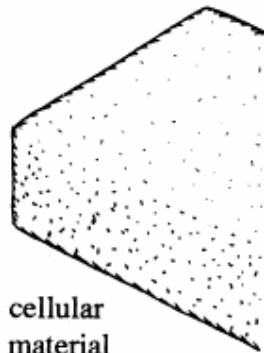
Trillingsdempers



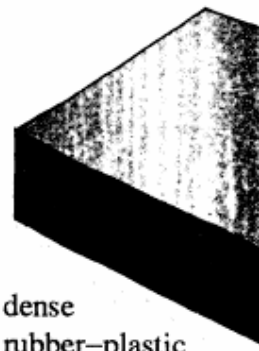
foam material,
rubber-plastic



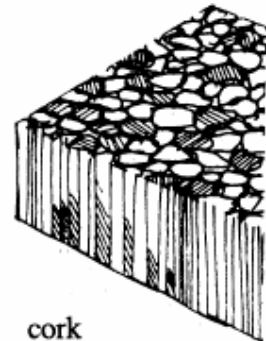
mineral wool



cellular
material
rubber-plastic



dense
rubber-plastic
material



cork

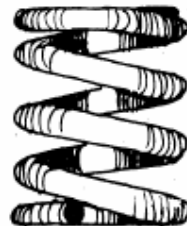
softer springs ← ● → stiffer springs



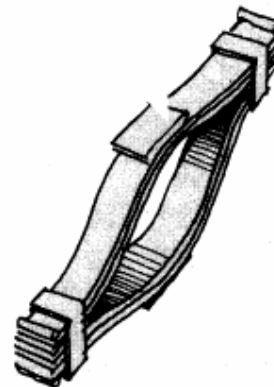
horizontal
wire coils



spiral spring,
long thin wire



spiral spring,
short thick wire



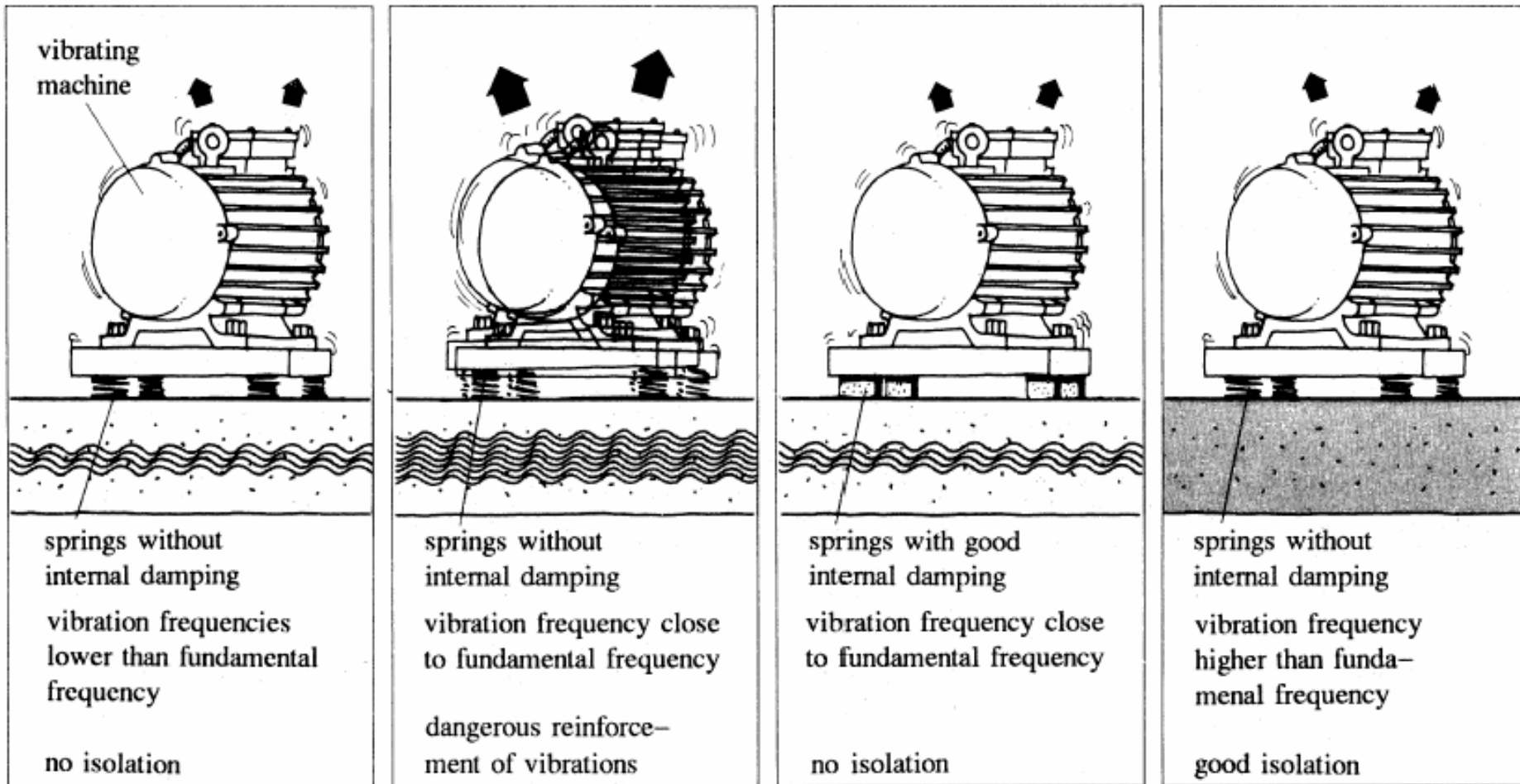
leaf spring



plate spring

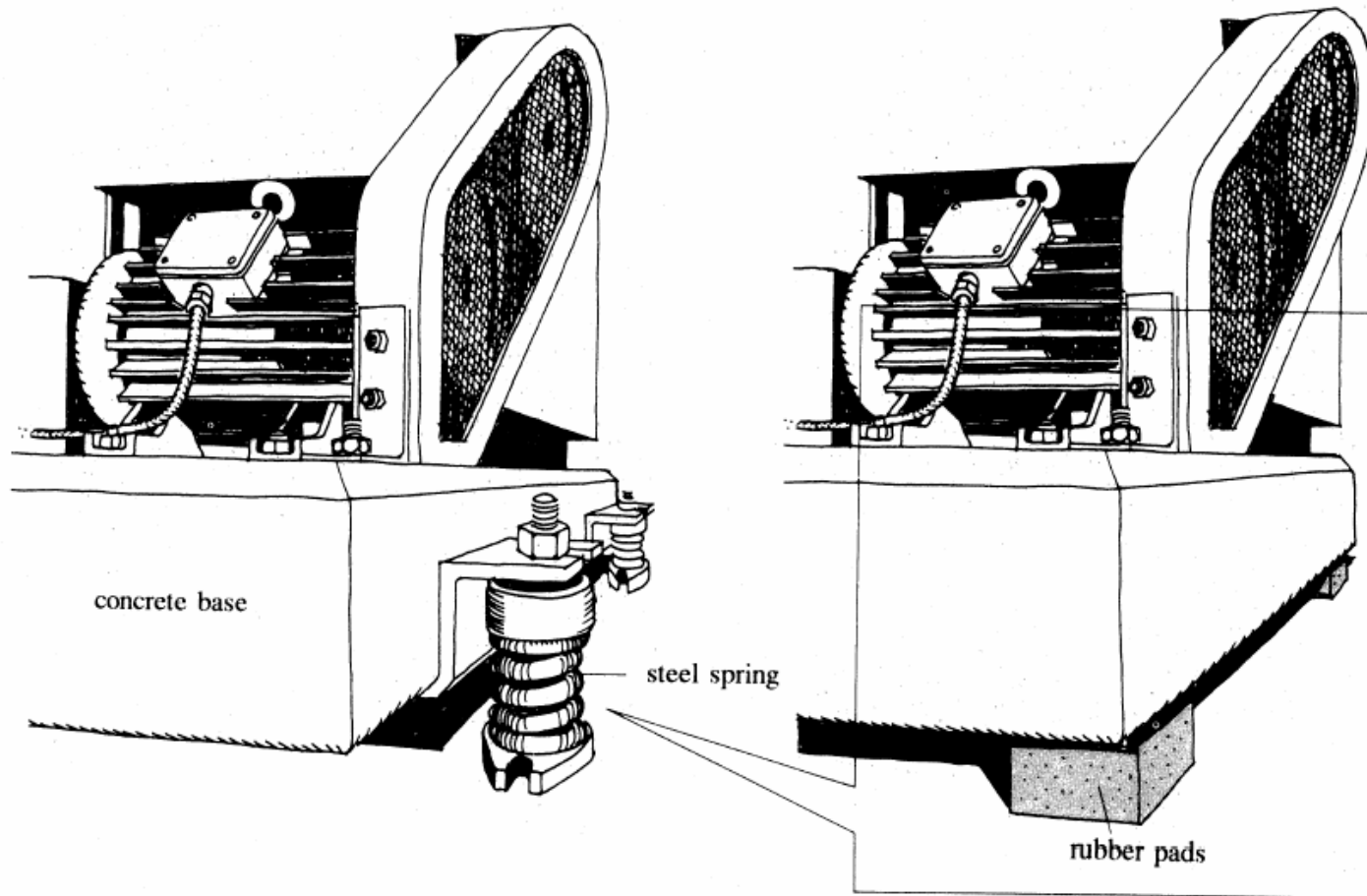
Keuze trillingsdemper

In functie van frequentiegebied

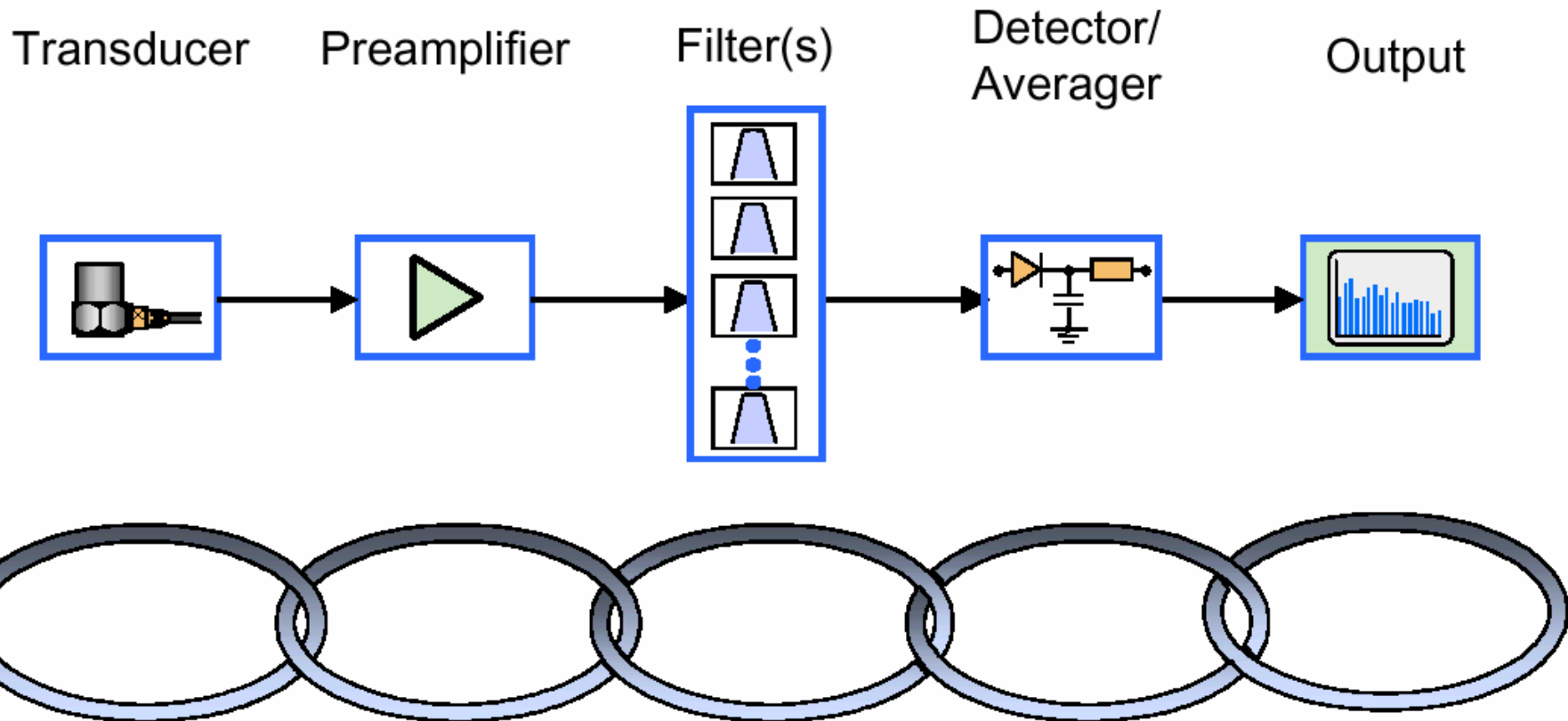


Keuze trillingsdemper

Continue werking versus onregelmatige werking



The Measurement Chain



Displacement, Velocity or Acceleration?



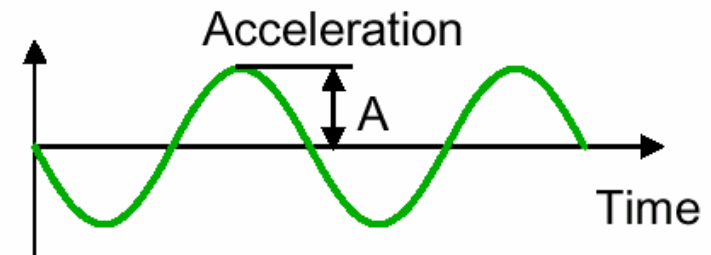
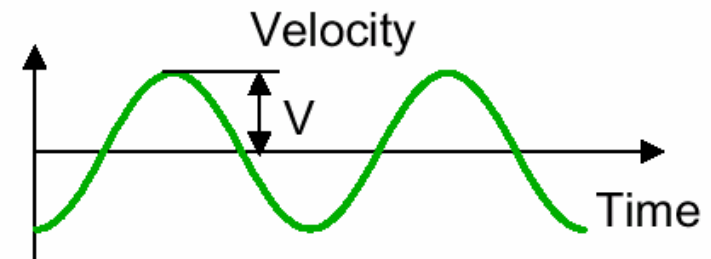
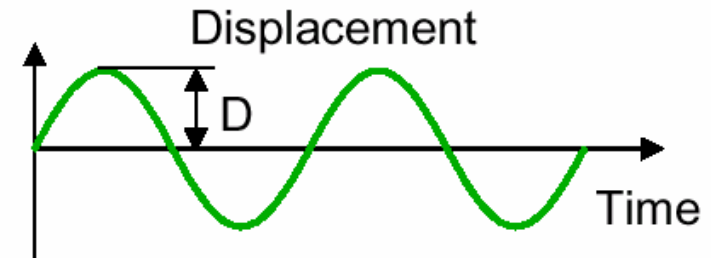
Detroit
35 Miles



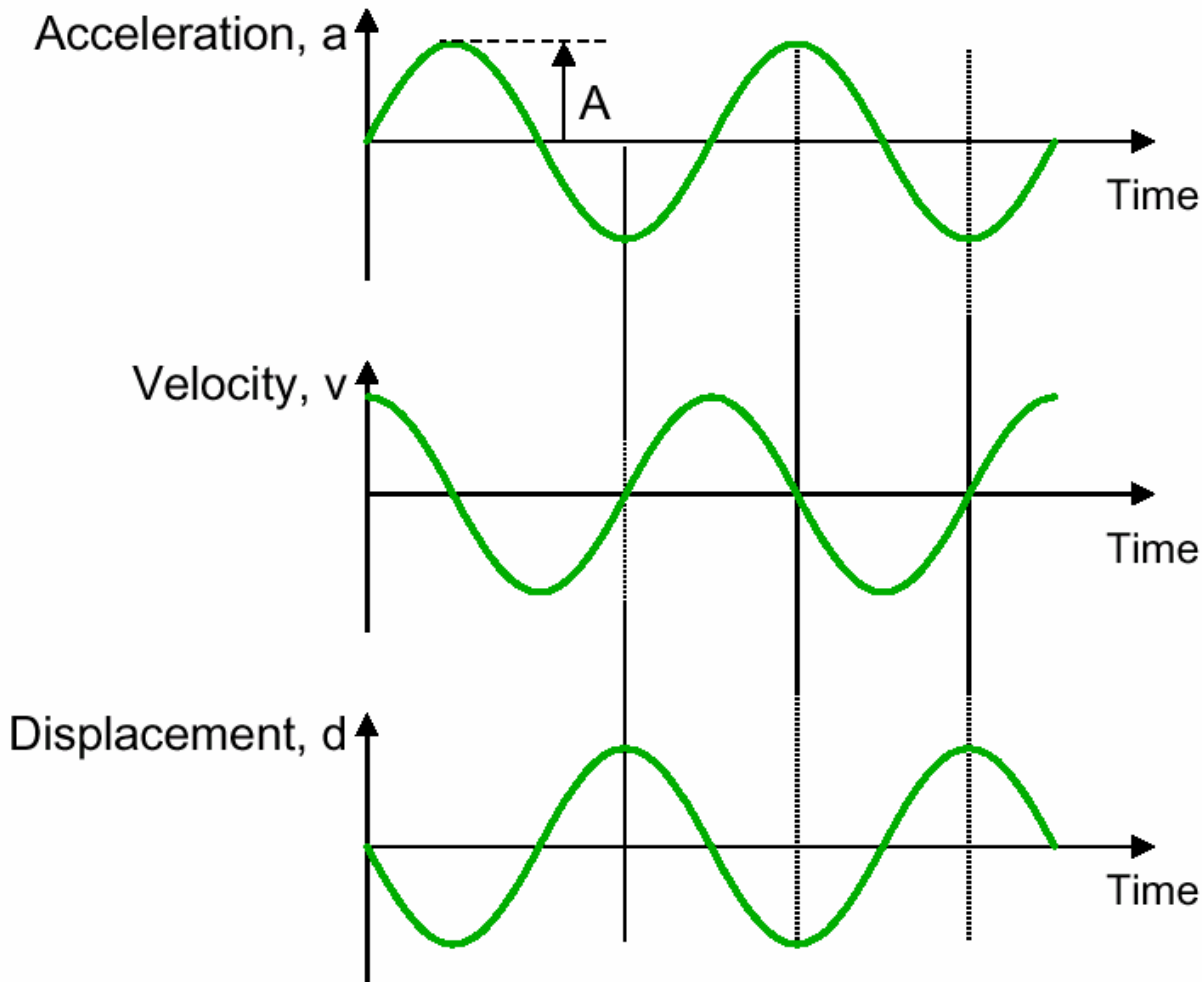
Speed
limit
65 MPH



TEST
0-60 MPH
in 8.6
second



Conversion from Acceleration to Displacement



$$a = A \sin \omega t$$

$$a = A$$

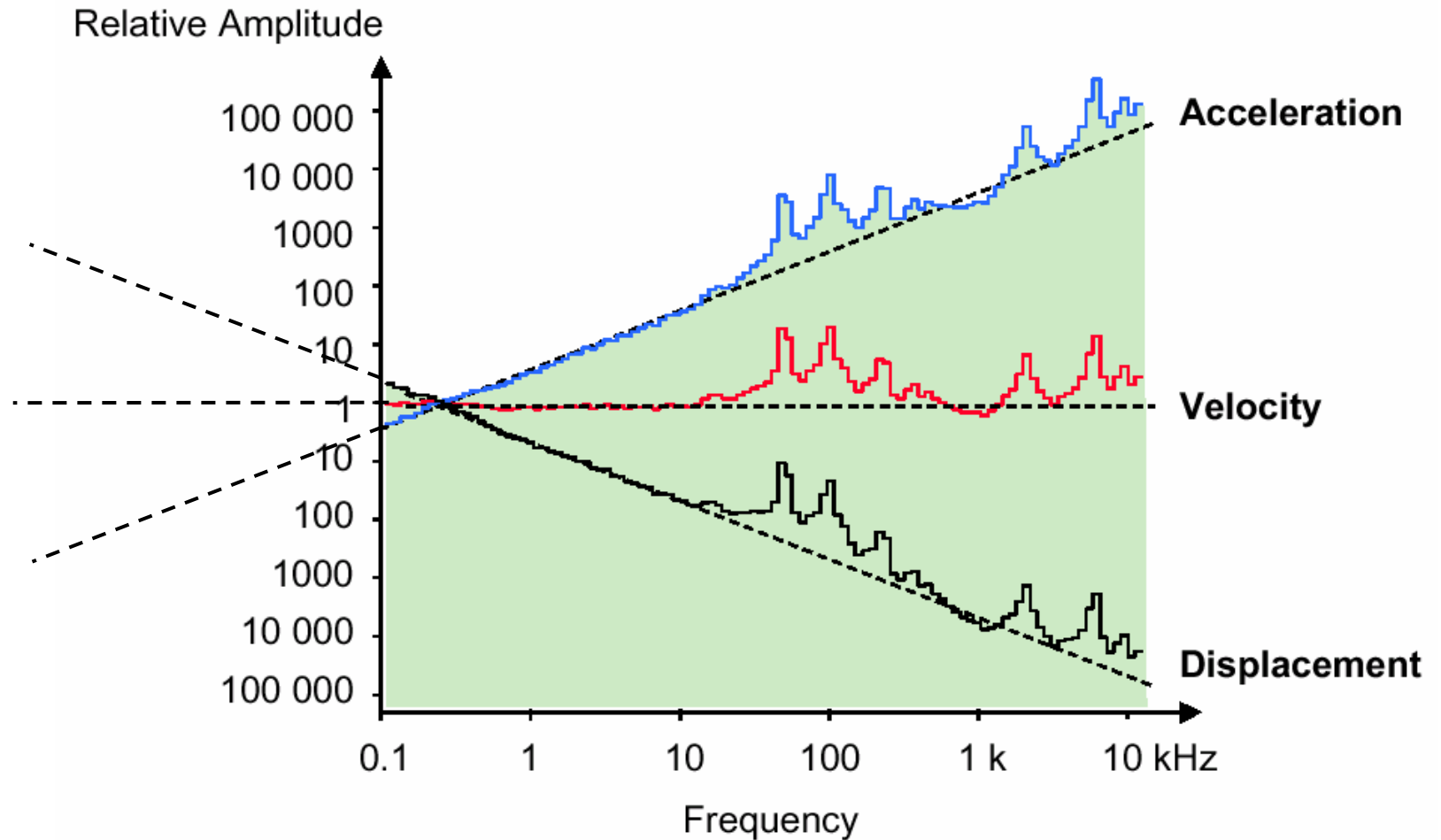
$$v = \int a \, dt = -\frac{A}{\omega} \cos \omega t$$

$$v = \frac{A}{\omega} = \frac{A}{2\pi f}$$

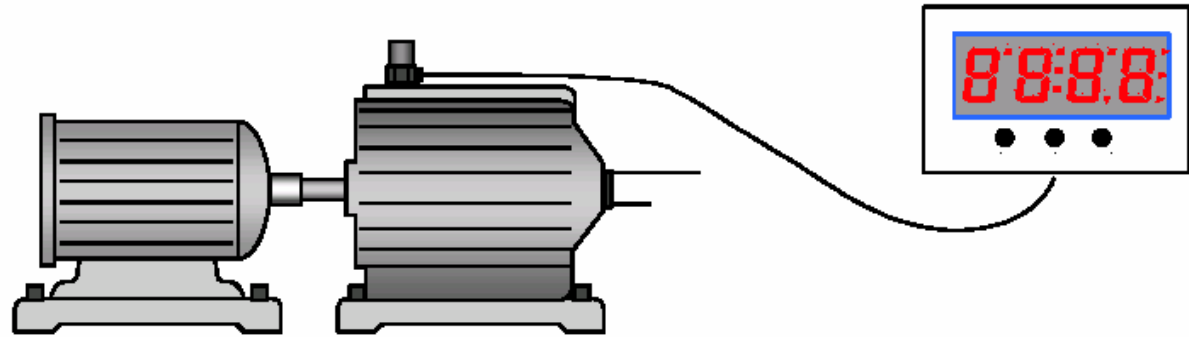
$$d = \iint a \, dt \, dt = -\frac{A}{\omega^2} \sin \omega t$$

$$d = \frac{A}{\omega^2} = \frac{A}{4\pi^2 f^2}$$

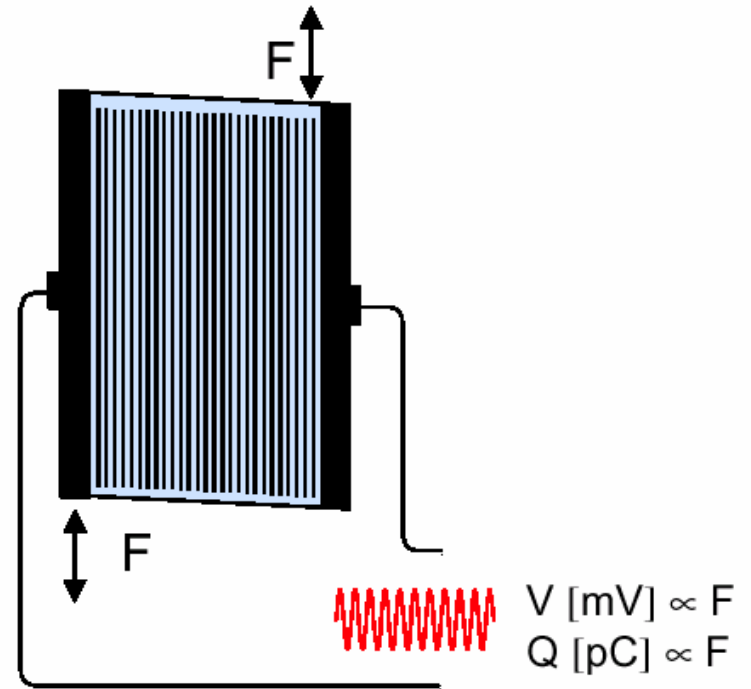
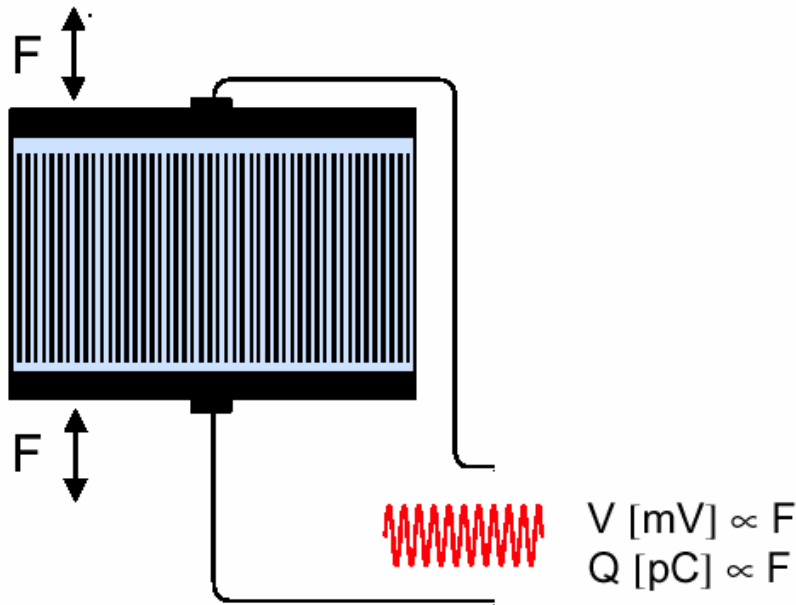
Vibration Parameters



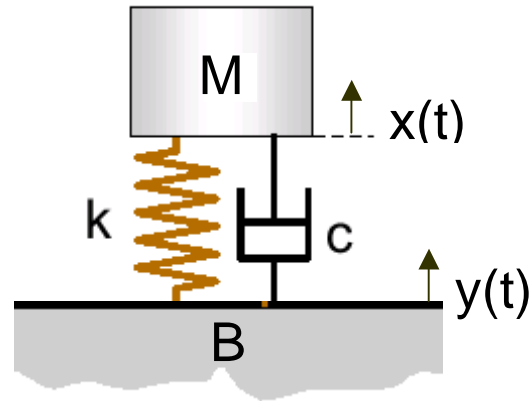
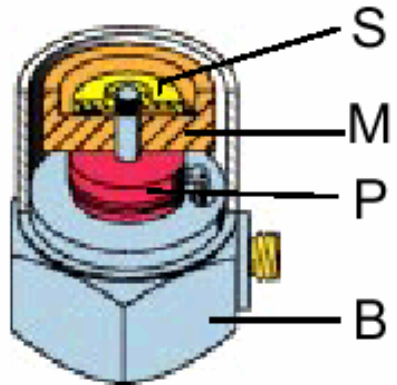
Piezo-electric Accelerometer



Principles of operation



Mass-Spring Transducers (Seismic)



$$f_p(t) = k(y(t) - x(t))$$

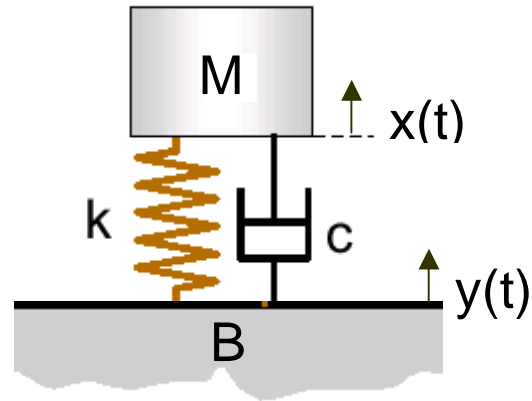
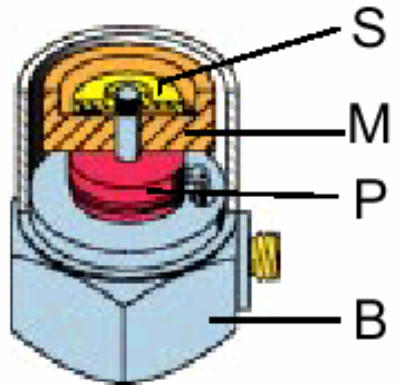
$$F_p(\omega) = k(Y(\omega) - X(\omega))$$

$$M\ddot{x}(t) = k(y(t) - x(t)) + c(\dot{y}(t) - \dot{x}(t))$$

$$-M\omega^2 X(\omega) = (k + i\omega \cdot c)(Y(\omega) - X(\omega))$$

$$X(\omega) = \frac{k + i\omega \cdot c}{-M\omega^2 + k + i\omega \cdot c} Y(\omega)$$

Mass-Spring Transducers (Seismic)



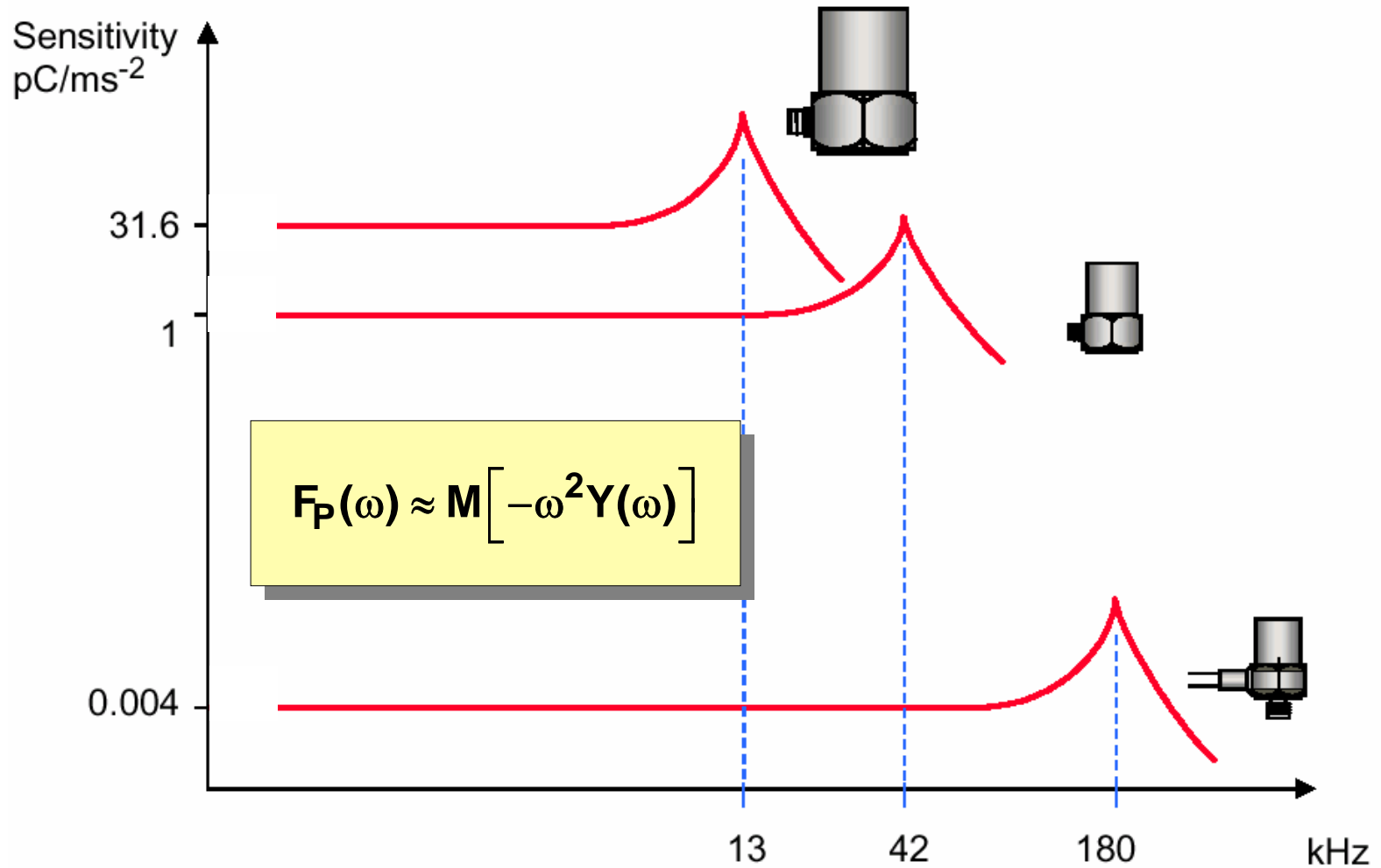
$$F_P(\omega) = k(Y(\omega) - X(\omega))$$

$$X(\omega) = \frac{k + i\omega \cdot c}{-M\omega^2 + k + i\omega \cdot c} Y(\omega)$$

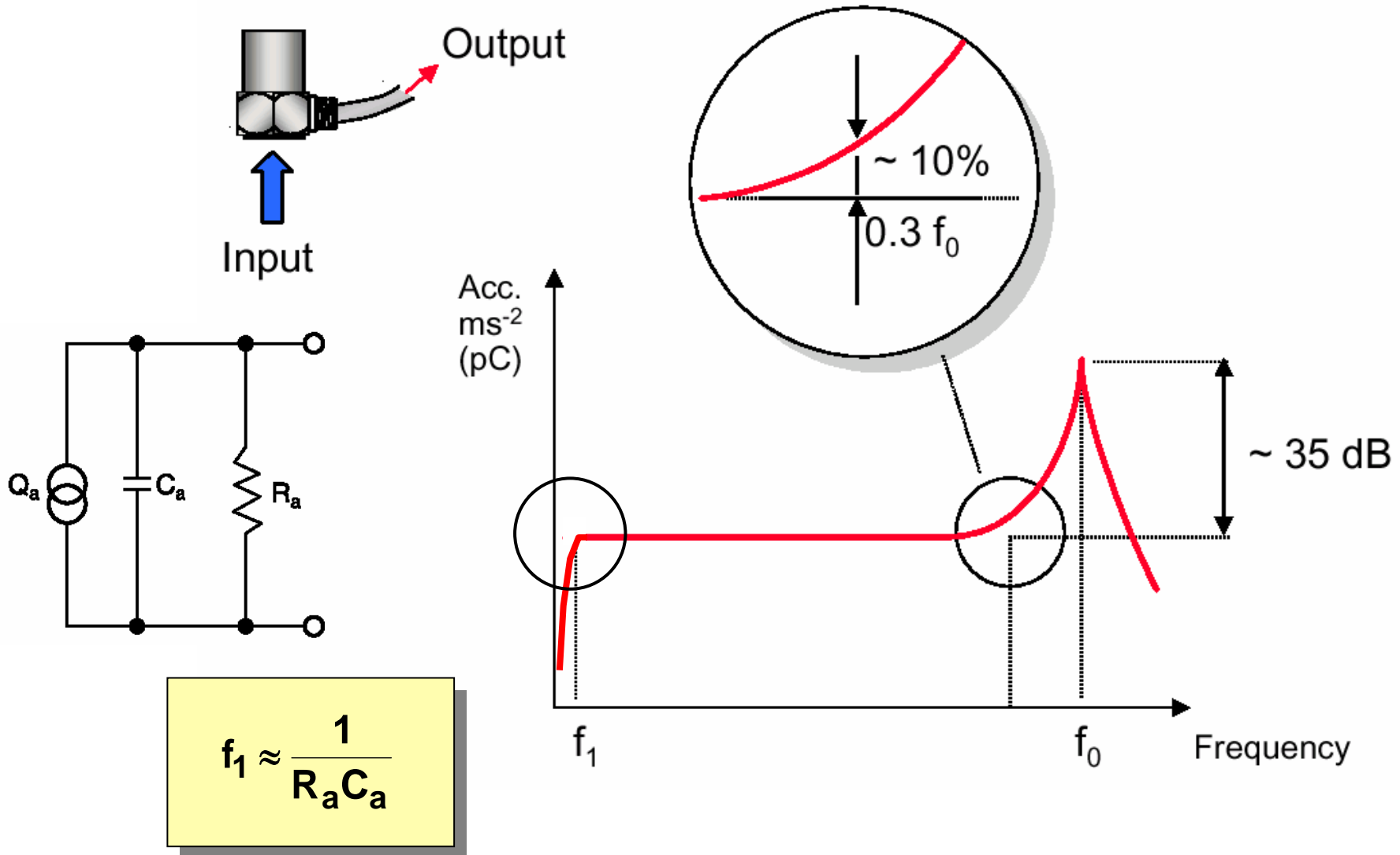
$$F_P(\omega) = k(Y(\omega) - X(\omega))$$

$$\begin{aligned} &= k \left(1 - \frac{k + i\omega \cdot c}{-M\omega^2 + k + i\omega \cdot c} \right) Y(\omega) \\ &= k \frac{-M\omega^2}{-M\omega^2 + k + i\omega \cdot c} Y(\omega) \end{aligned}$$

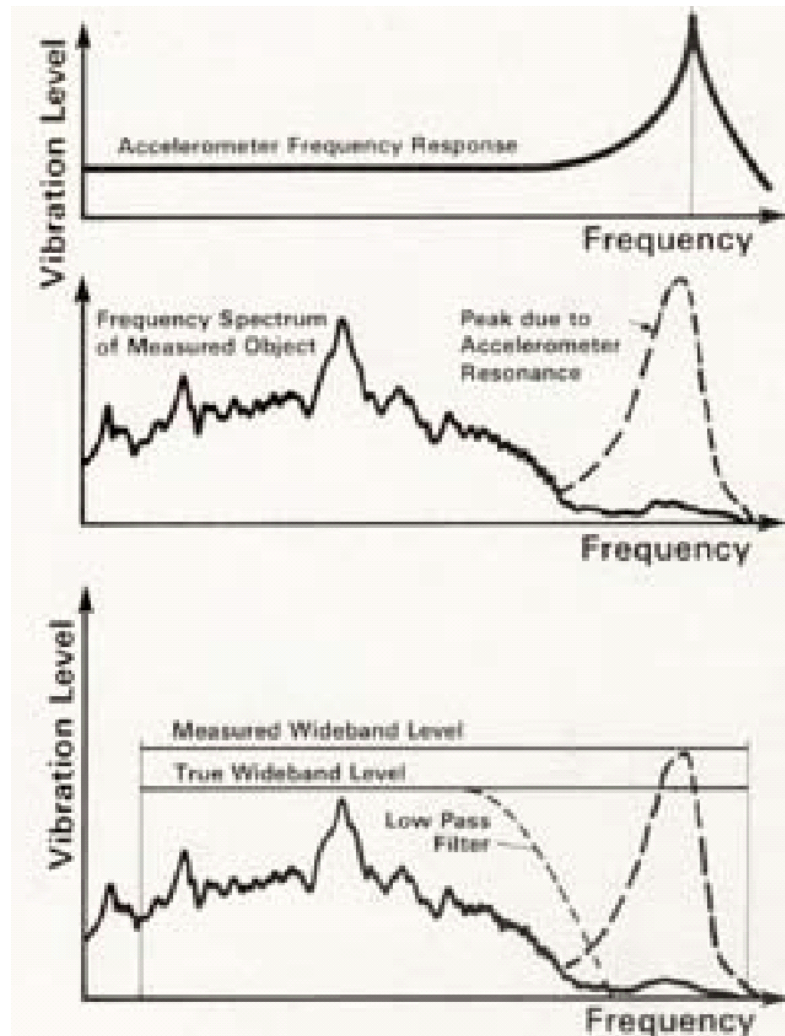
Sensitivity and Frequency Range



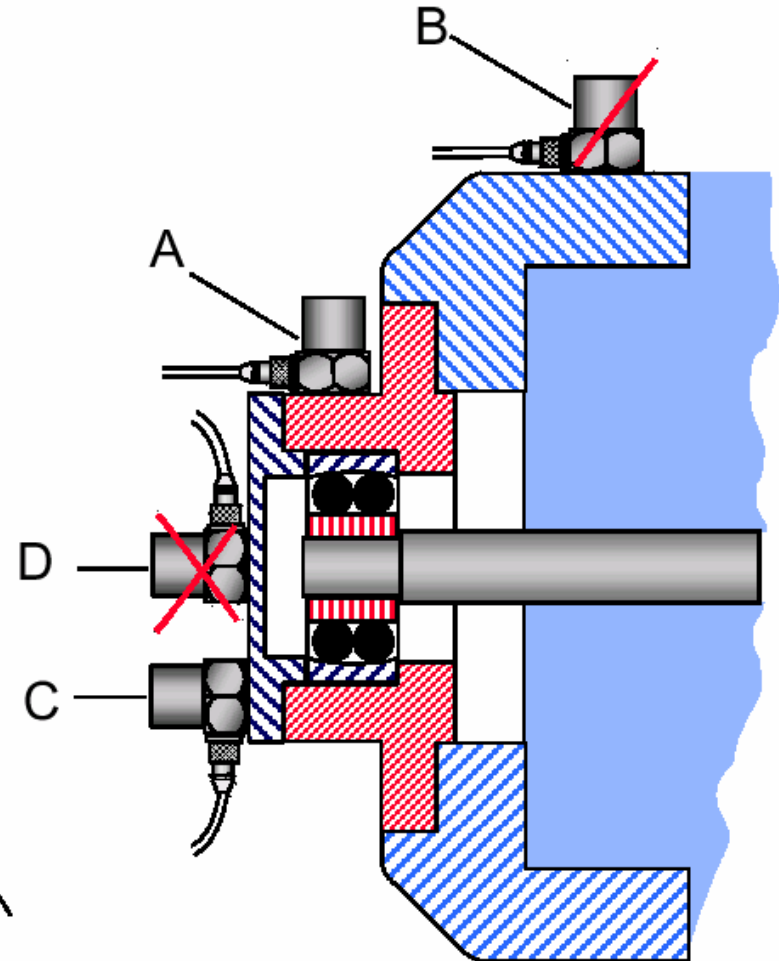
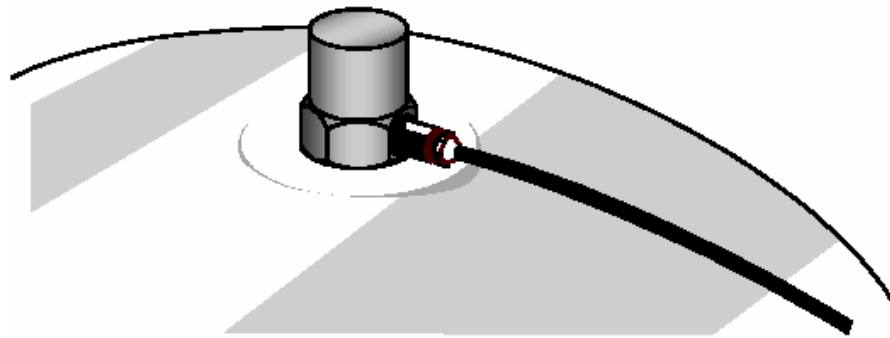
Useful Frequency Range



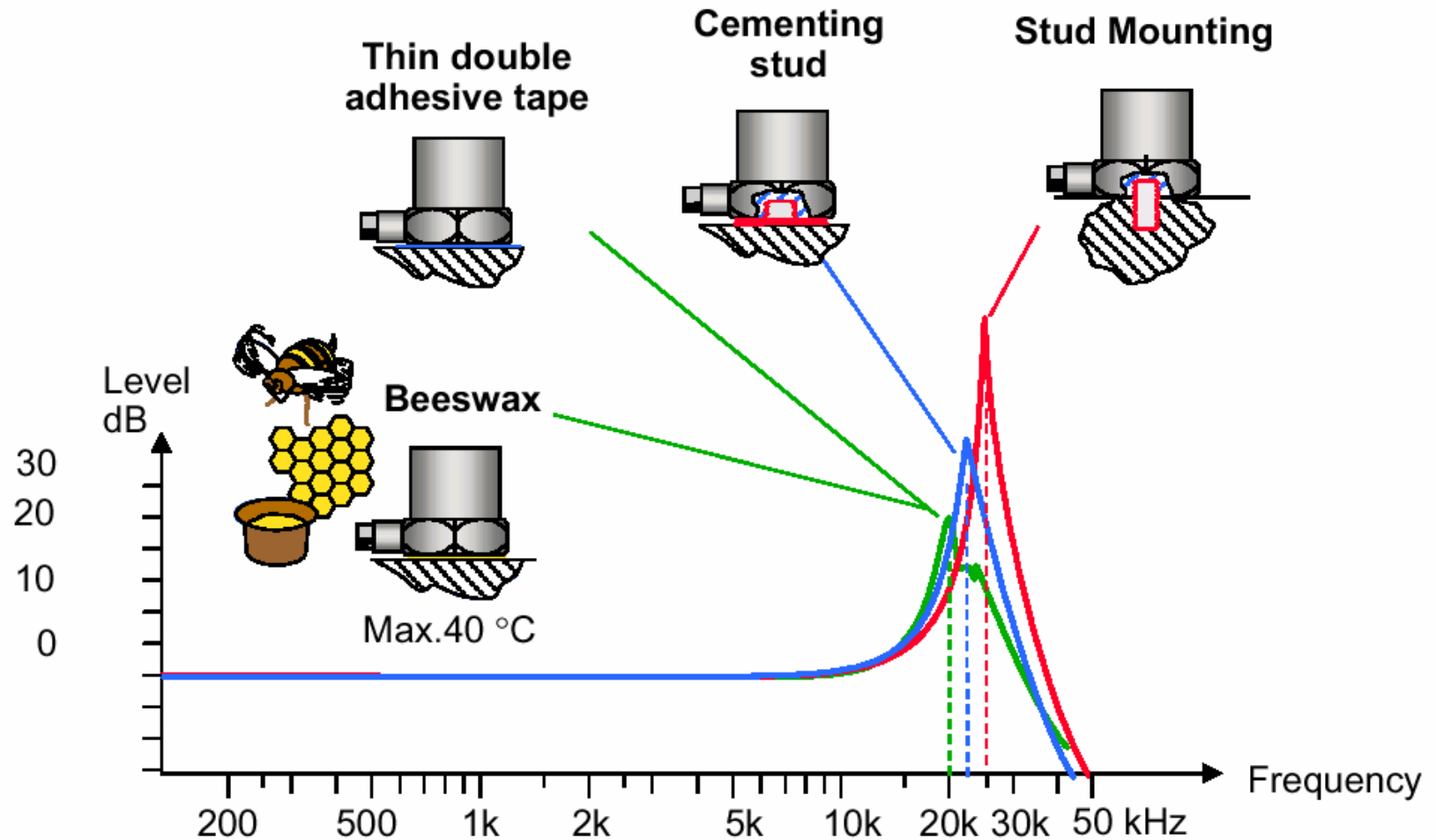
Avoiding Errors due to Sensor Resonance



Choosing the Mounting Position



Acceleration Mounting



The Calibration Chart



Calibration Chart for Accelerometer Type 4381

Serial No.: 2901215

Reference Sensitivity* 10.07 pC/ms²
 or 99.0 pC/g
 at 159.2 Hz ($\alpha = 1000 \text{ s}^{-1}$) and 24 °C

Upper Frequency Limit (+10%): 48 kHz

Mounted Resonance Frequency: Typ. 16 kHz

Undamped Natural Frequency: Typ. 25 kHz

Transverse Sensitivity:
 Maximum (at 30 Hz, 100 ms⁻²): 1.2 %
 Angle of minimum, α : (see drawing) 68

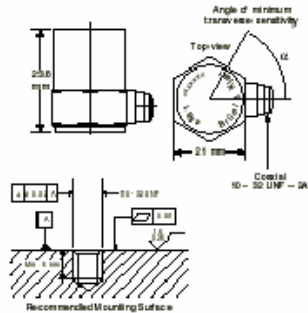
Transverse Resonance Frequency: Typ. 5 kHz

Acceleration Range:
 Max. operational shock (\pm peak): 20 kms⁻²
 Max. continuous sinusoidal: 20 kms⁻²

Capacitance of Transducer: Typ. 1100 pF

Capacitance of cable AO 0038: Typ. 110 pF

Isolation Resistance (room temp.): >20 G Ω hm



*This calibration is traceable to the National Institute of Standards and Technology, USA and Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany.

Physical:

Case Material: Titanium, ASTM Grade 2

Sensing Element: Piezoelectric, Type PZ 29

Construction: Delta Shear

Weight: 48 gram excl. cable

Mounting Thread: 10-32 UNF-2B

Mounting Surface Flatness: <3 μ m

Mounting Torque (Recommended): 1.8 Nm
 Max. 3.5 Nm, Min. 0.5 Nm

Seismic Mass: 25 gram

Center of Gravity of Seismic Mass: 14 mm above mounting surface on central axis

Center of Gravity of Accelerometer: 11.5 mm above mounting surface

Mounting Technique:

Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness. If necessary, machine surface as per drawing of recommended mounting surface. Fasten the accelerometer using a 10-32 UNF-2A stud. Take care not to exceed the max. recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes. A thin film of oil or grease on the mounting surface improves the mounting stiffness. For other types of mounting see Brüel & Kjær "Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers" handbook.

Environmental:

Temperature Range: -74 to +250 °C
 (-100 to +482 °F)

Temp. Transient Sensitivity (3 Hz LLF): Typ. 0.04 ms⁻²/°C

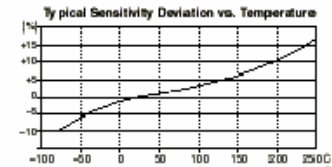
Magn. Sensitivity (50 Hz): Typ. 1 ms⁻²/G

Acoustic Sensitivity (154 dB SPL, 2-100 Hz): Typ. 0.001 ms⁻²

Max. Non-destructive Shock: 20 kms⁻² peak

Humidity: Welded, Sealed

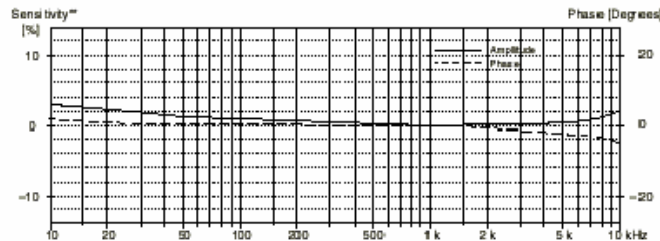
Base Strain Sensitivity (at 250 μ m in base plane): Typ. 0.003 ms⁻²/ μ m



Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-1.969

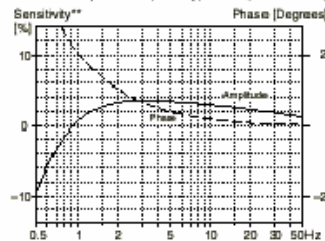
Date 98.08.07 Operator TVP

Individual Frequency Response
 Obtained on Brüel & Kjær Calibration System Type 9810.

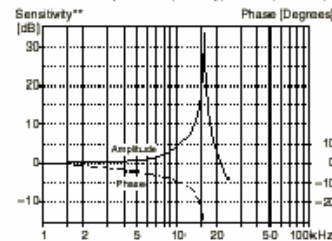


**Deviation from Reference Sensitivity

Typical Low Frequency Response
 Ind. Brüel & Kjær Preamplifier Type 2626 (LLF = 0.3 Hz)



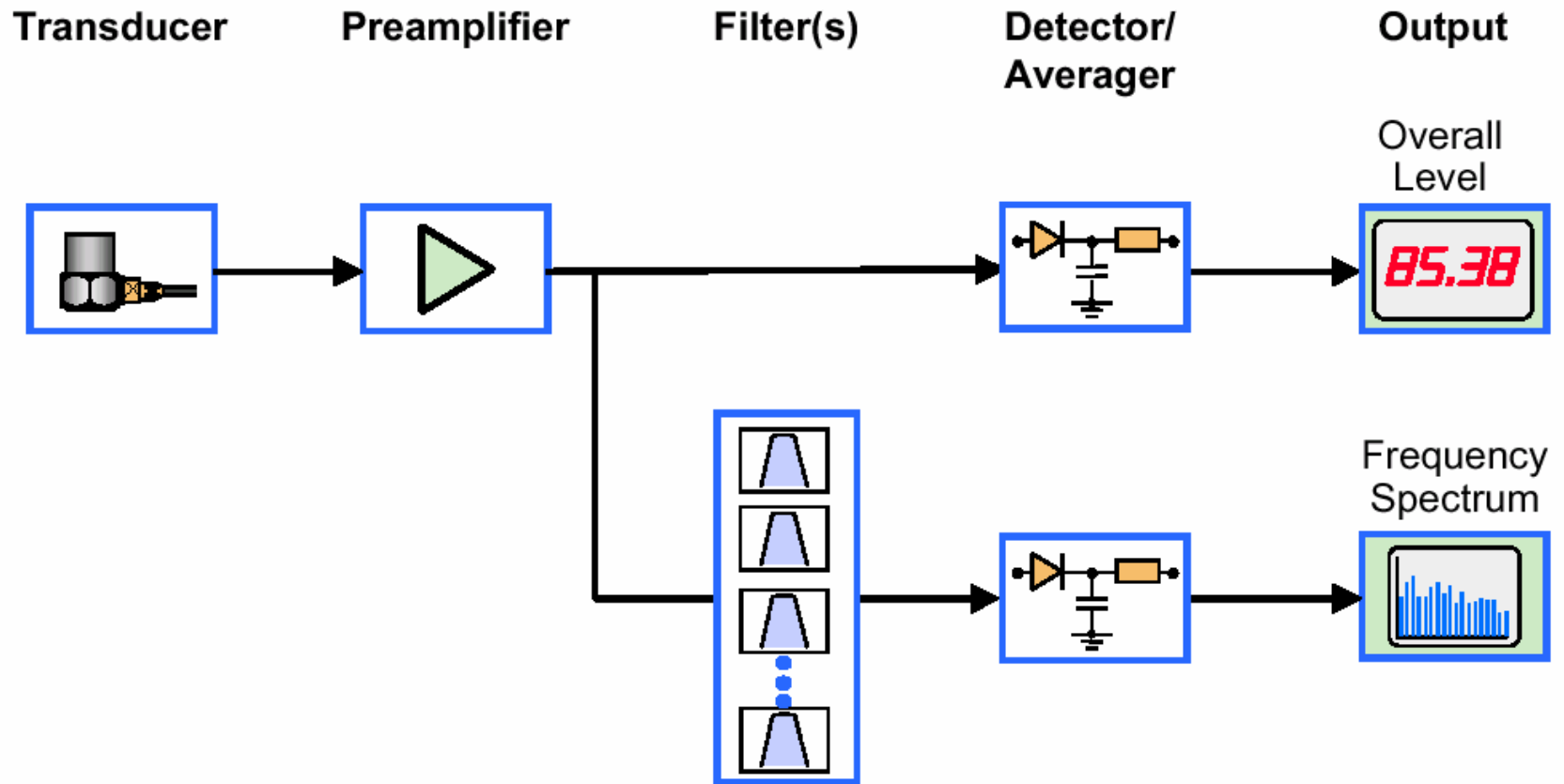
Typical High Frequency Response
 Ind. Brüel & Kjær Preamplifier Type 2626 (LLF: Lin)



Accelerometer Type 4381

Serial No.: 2901215

Overall Level and Frequency Spectrum

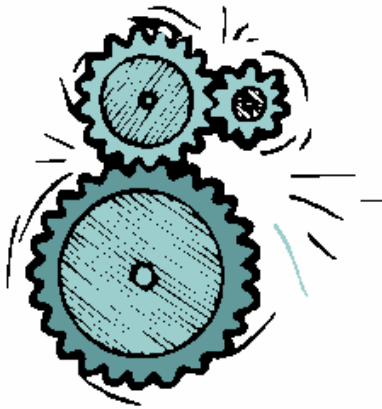
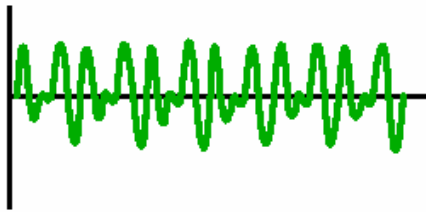


Which Time Signal Parameters Do We Use?

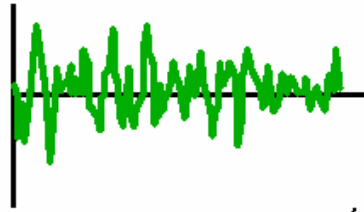
- Peak
- Peak-Peak
- Average
- RMS
- Crest Factor
- Periodicity/Repetition Rate
- Duration

Types of Signals

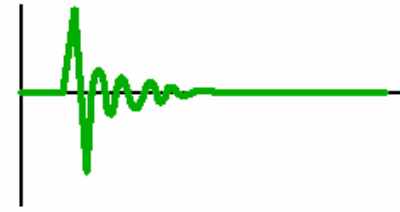
Periodic



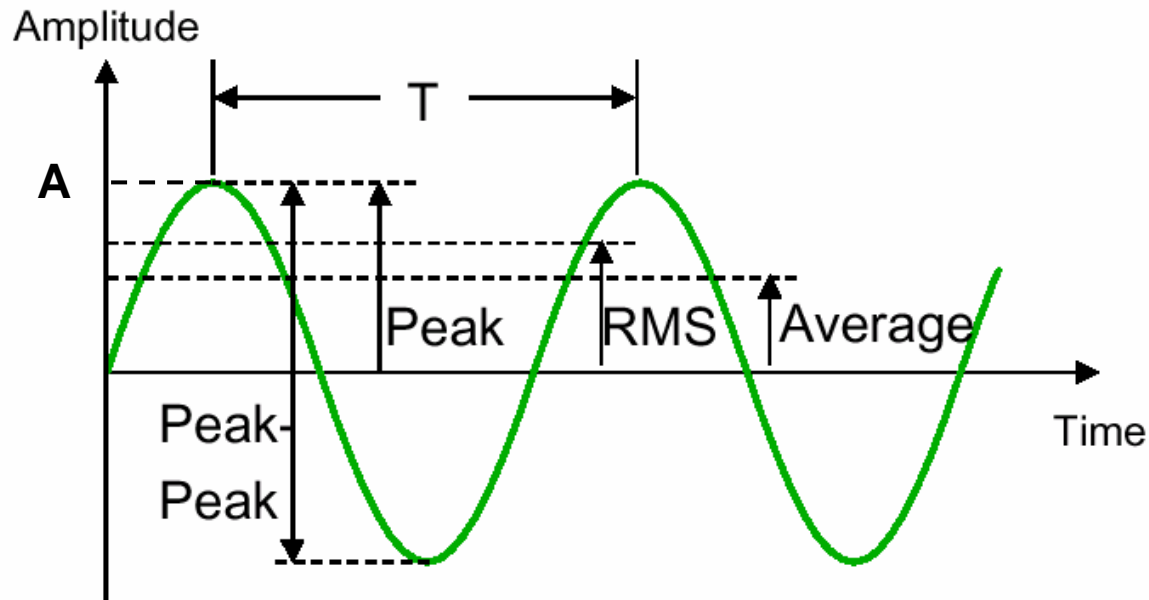
Random



Transient



Signal Parameters for a Harmonic Signal



$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

$$\text{Average} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$

$$\text{Crest Factor} : \frac{\text{Peak}}{\text{RMS}}$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{A^2}{2}}$$

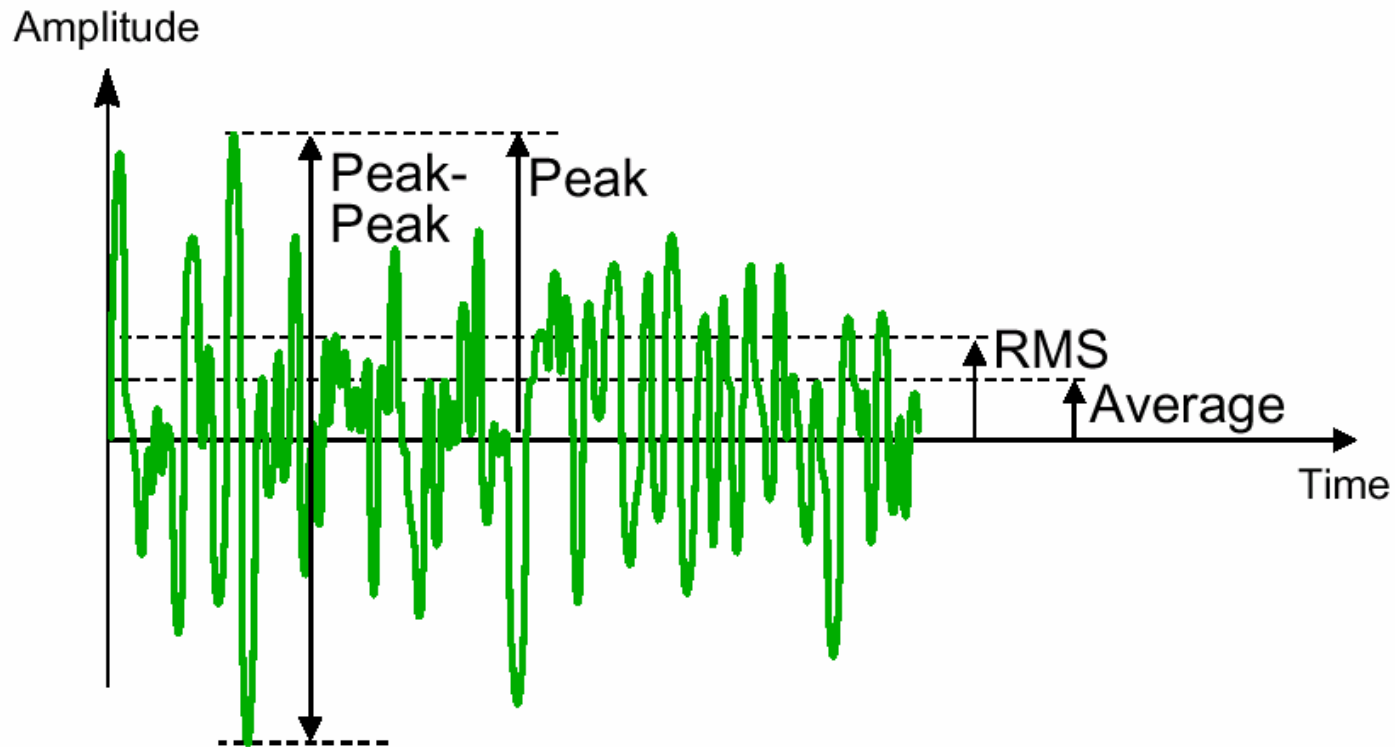
$$\text{Average(abs)} = \frac{2}{\pi} A$$

$$\text{Peak} = A$$

$$\text{Average} = 0$$

$$\text{CF} = \sqrt{2}$$

Signal Parameters for a Random Signal

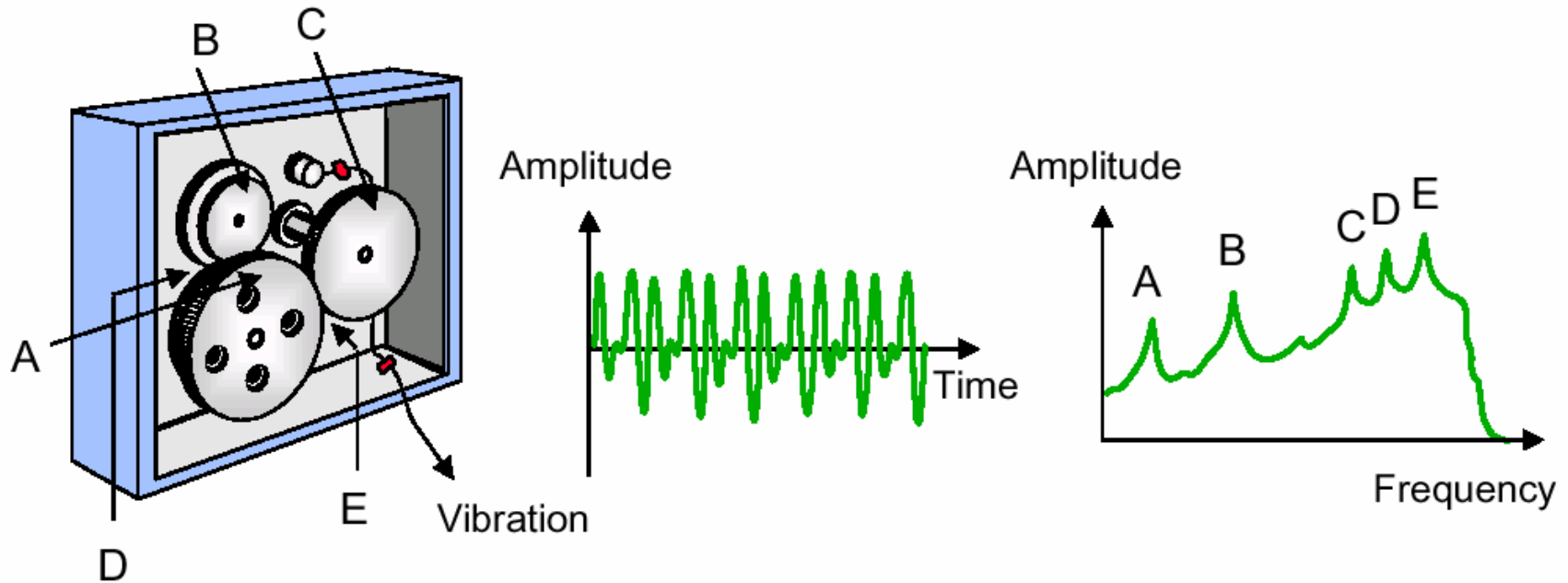


$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

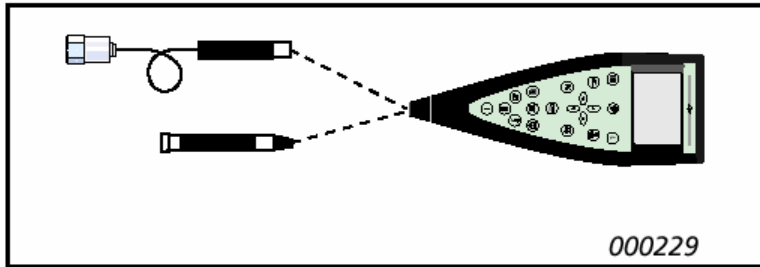
$$\text{Average} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$

$$\text{Crest Factor} : \frac{\text{Peak}}{\text{RMS}}$$

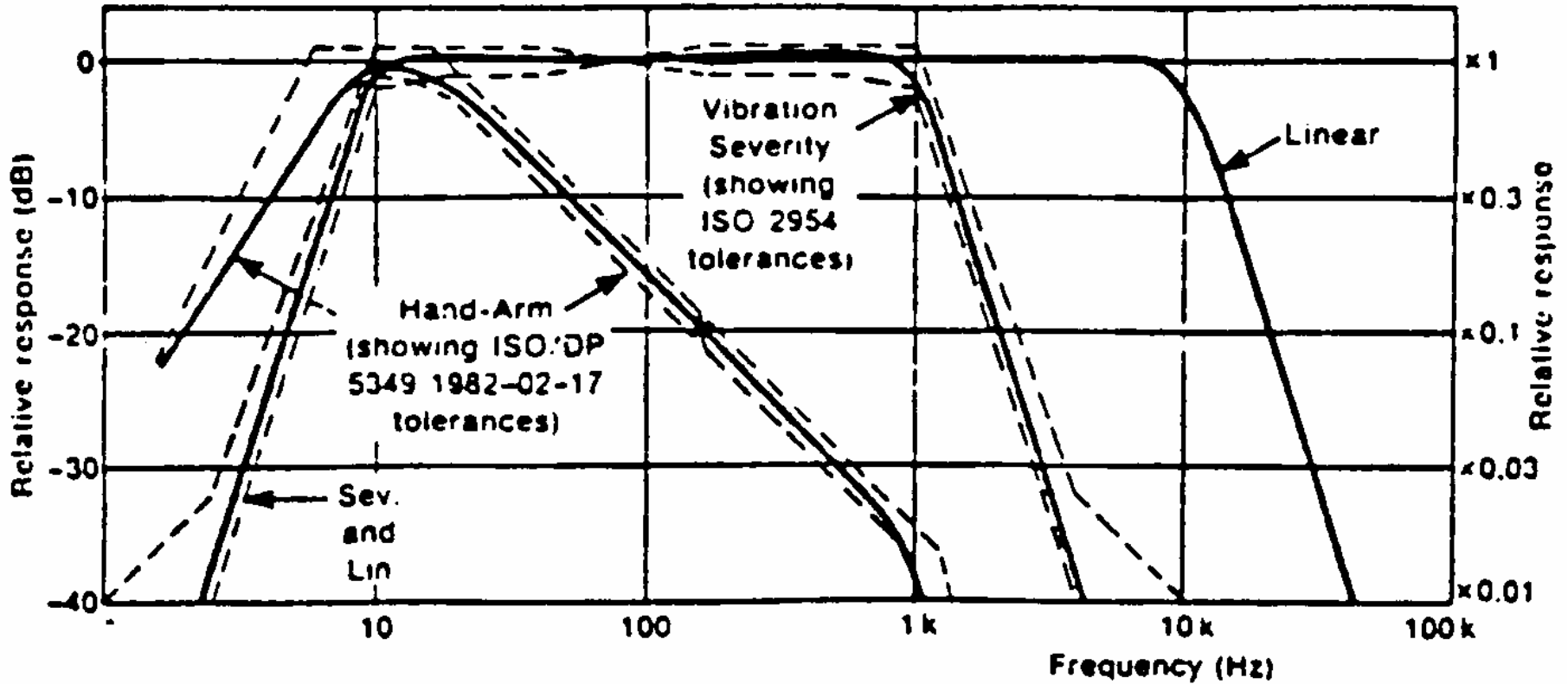
Why Make a Frequency Analysis?



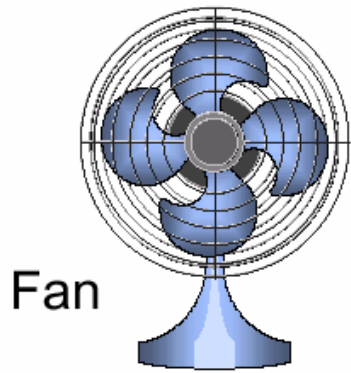
Hand-held Instrumentation



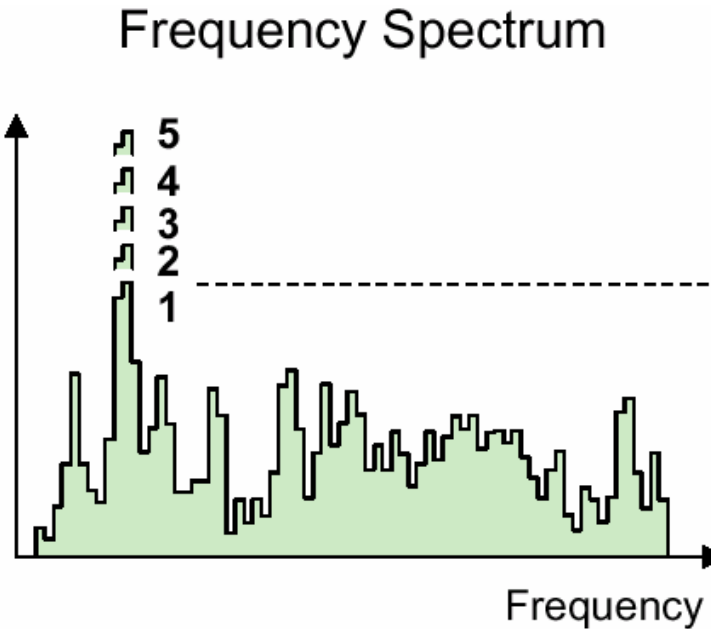
Filters



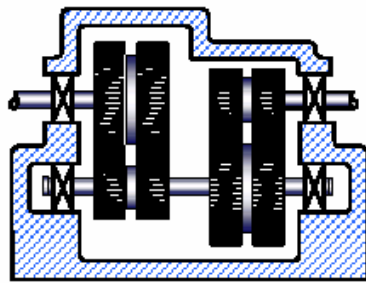
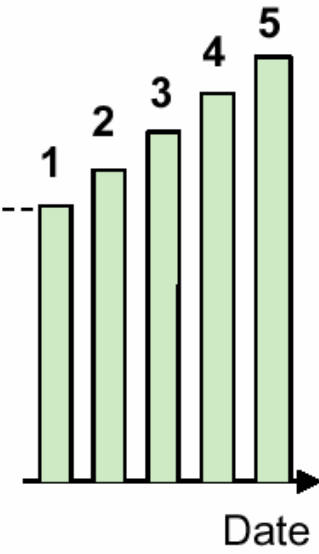
Trillingsmonitoring



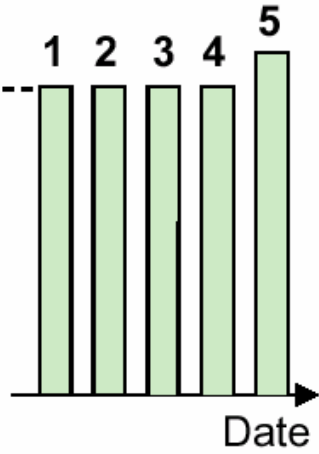
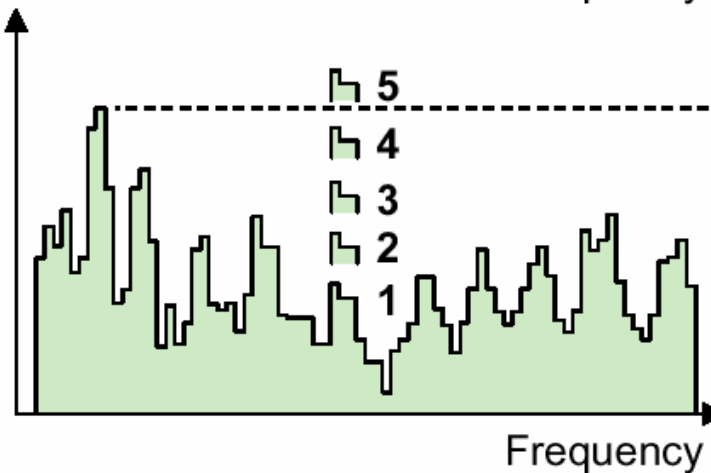
Vibration



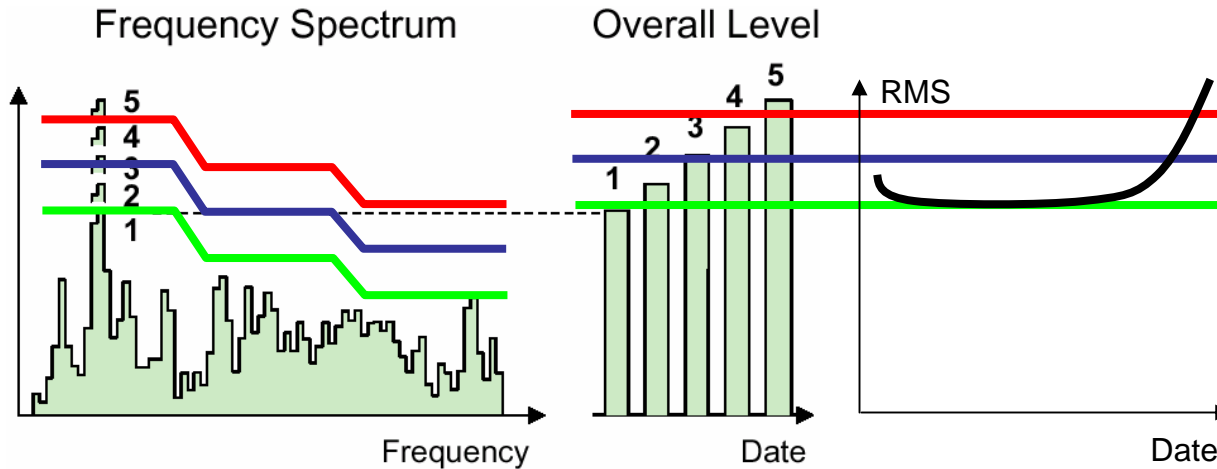
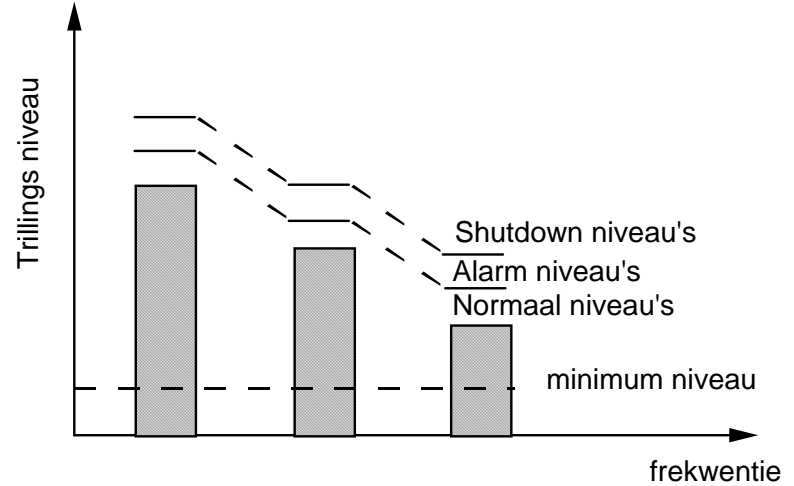
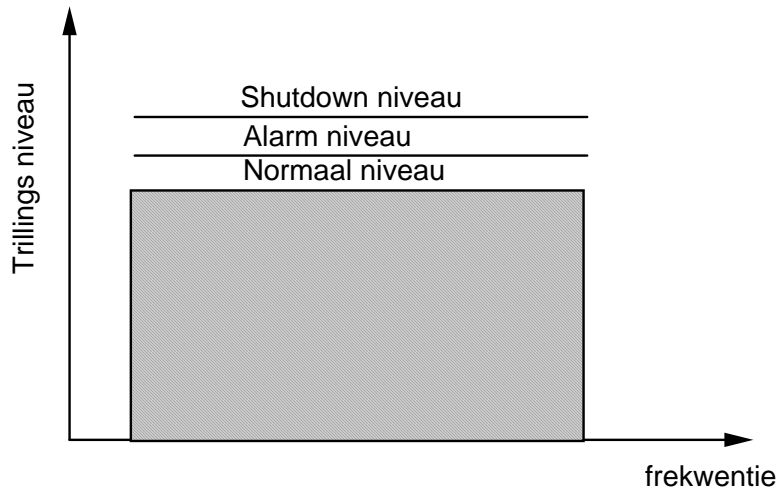
Overall Level



Vibration



Trillingsmonitoring

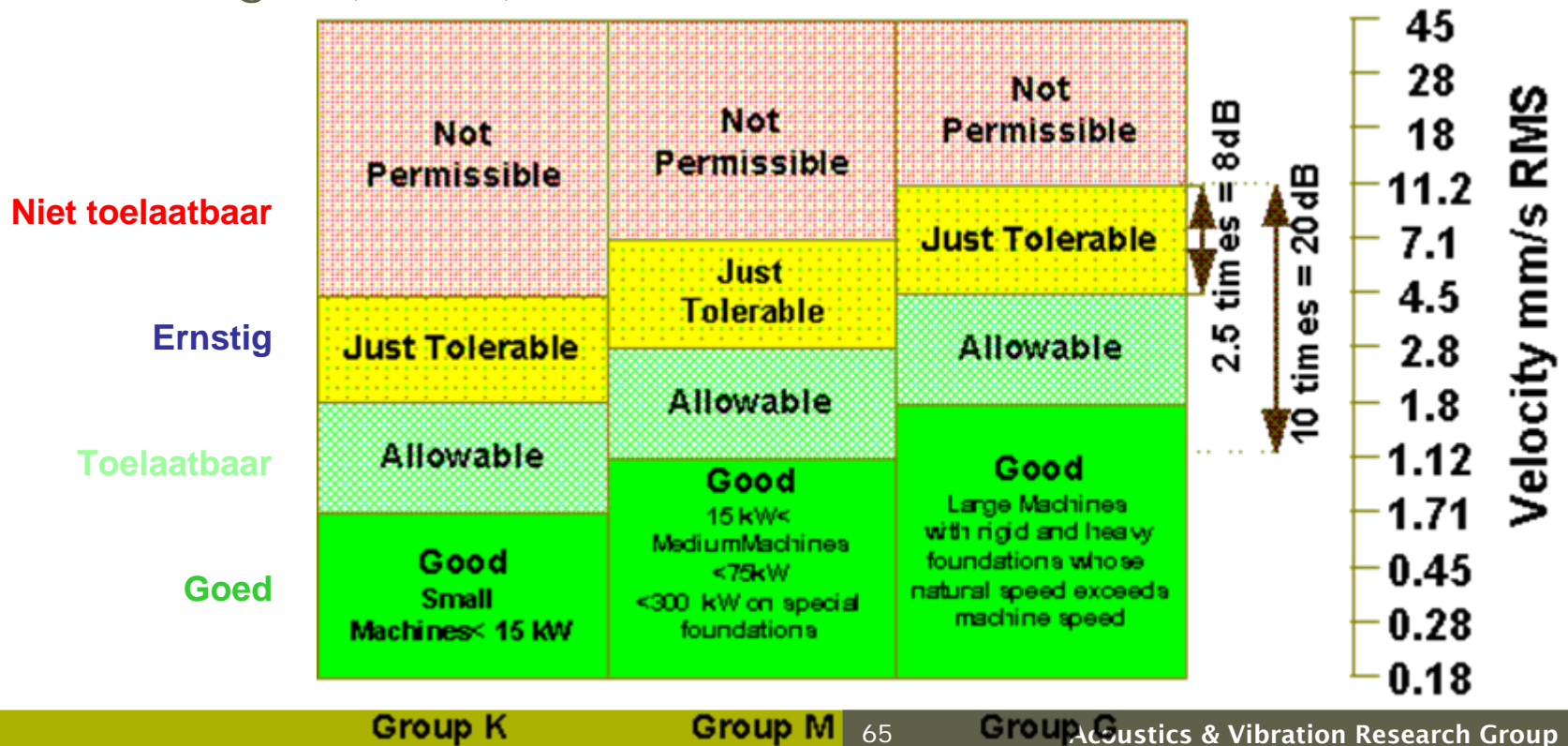


Niveaus via normen, bvb ISO 2372

Opdeling in klassen afhankelijk van

- Vermogen
- Fundering
- Werkingsprincipe

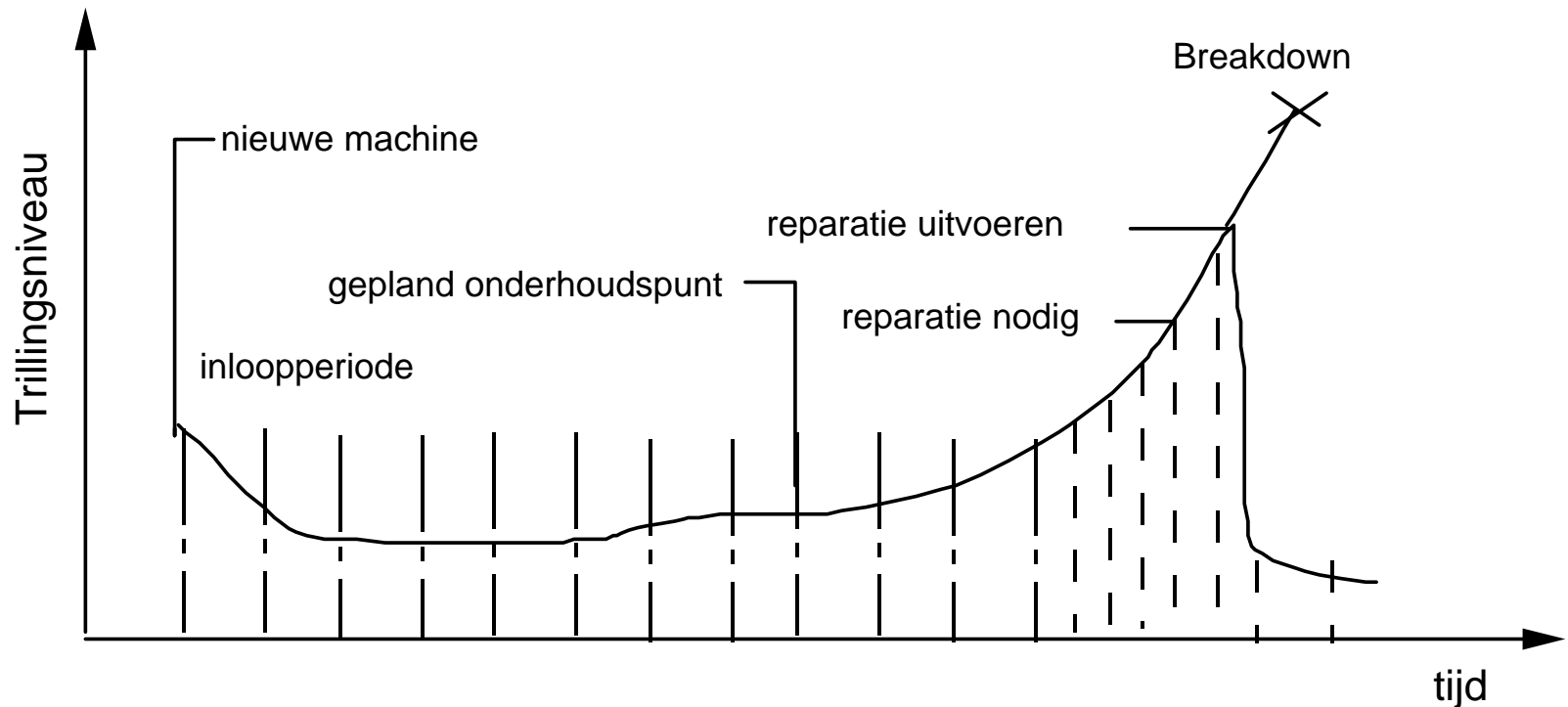
RMS metingen (mm/s) tussen 10 en 1000 Hz



Niveaus via Trend Analyse

De badkuipcurve

- Alarmniveau
 - x 2.5 (+ 8 dB)
- Onderhoudsniveau
 - x 10 (+ 20 dB)

















Effects of Vibration on the Human Body



Hand-arm vibration exposure
Whole-body vibration exposure
Standard and guidelines for vibration exposure
Protection against vibration
Effects of vibration on health

Effects of Vibration ...

This is 2 Hz at $1.5 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ 
 This is 3 Hz at $1.5 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ 
 This is 4 Hz at $1.5 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ 
 This is 5 Hz at $1.5 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ 
 This is 6 Hz at $1.5 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ 
 This is 7 Hz at $1.5 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ 
 This is 8 Hz at $1.5 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ 

This is $0.5 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ at 4.5 Hz 
 This is $0.63 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ at 4.5 Hz 
 This is $0.8 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ at 4.5 Hz 
 This is $1.0 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ at 4.5 Hz 
 This is $1.25 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ at 4.5 Hz 
 This is $1.6 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ at 4.5 Hz 
 This is $2.0 \text{ ms}^{-2} \text{ rms}$ at 4.5 Hz 

Vibration Exposure

Whole-body vibration exposure (WBV)

- energy enters the body through a seat or the floor
- it affects the entire body
- operators of trucks, buses, tractors, ...

Hand-arm vibration exposure (HAV)

- energy enters the body through hand-held equipment
- chain saws, pneumatic tools, rock drills, ...

Gevolgen voor de gezondheid – WBV

Risico factoren voor de ontwikkeling van lage rugpijn

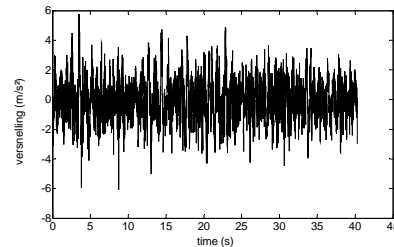
- Zwaar fysisch werk



- Langdurig zitten (houding)



- Trillingen



Gevolgen voor de gezondheid – HAV

De pathologie is afhankelijk van de trillingsfrequenties opgewekt door de gehanteerde machines

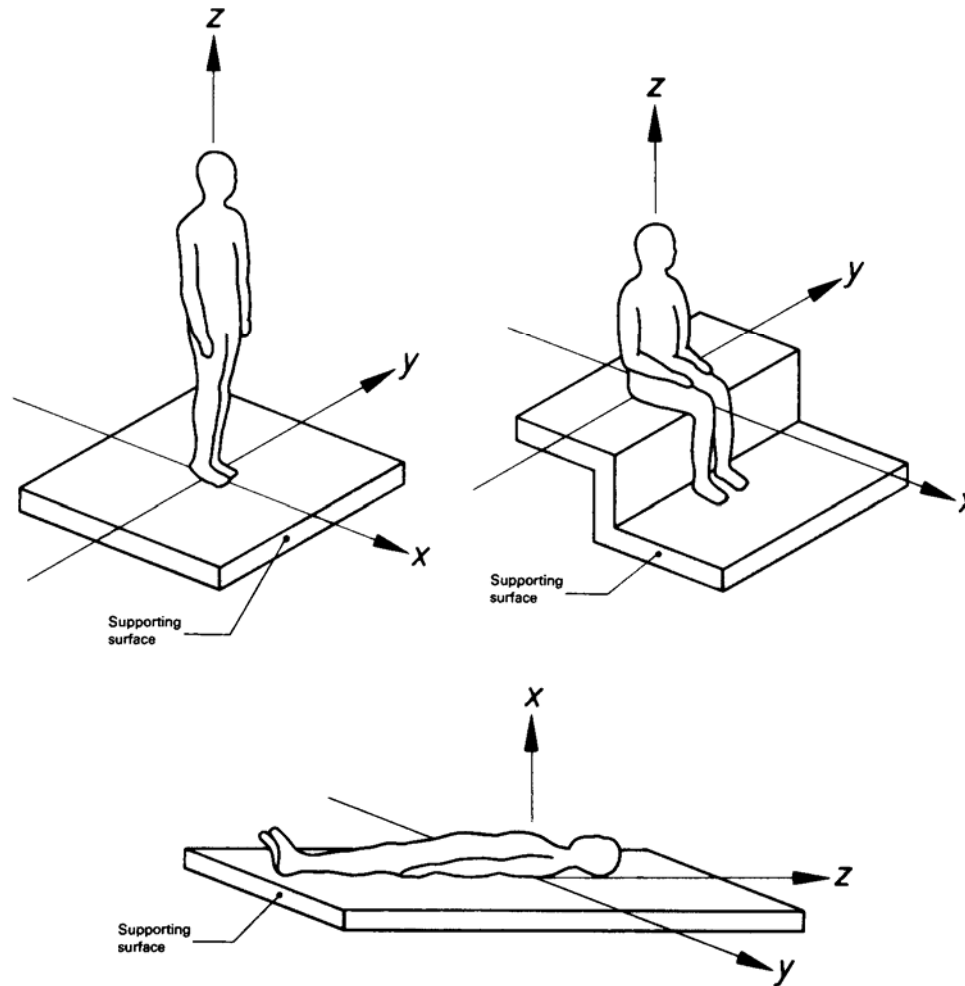
- Machines met laagfrequente trillingen (< 60 Hz), zoals percussiemachines, breekhamers, afsteekmachines, ... :
 - bot- en gewrichtsaandoeningen (holte in bot, artrose) in de schouders (< 20 Hz), de ellebogen (< 40 Hz) en de polsen
 - in de polsen, ellebogen en schouders (< 60 Hz): ziekte van Kienböck (necrose van het os lunatum) of van Köhler (pseudo-artrose van het os scaphoïdeum).
- Machines met trillingen van middelmatige frequenties (60 tot 200 Hz): roterende machines (4.000 tot 12.000 toeren/min.) zoals verticale slijpmachines, polijstmachines, ... :
 - vaatstoornissen (fenomeen van Raynaud of “witte vingers”) in de vingerkootjes of de handpalm.
- Machines met hoogfrequente trillingen (> 200 Hz): snel draaiende machines (> 12.000 toeren/min.) zoals snellopende polijstmachines of afbraammachines, ... :
 - aandoeningen van de zenuwen in vingers en handen: paresthesieën, tintelingen, gevoelloosheid in de vingers, verlies van tastzin en van warmte- en koudegevoel.

Vibration Exposure Accumulation

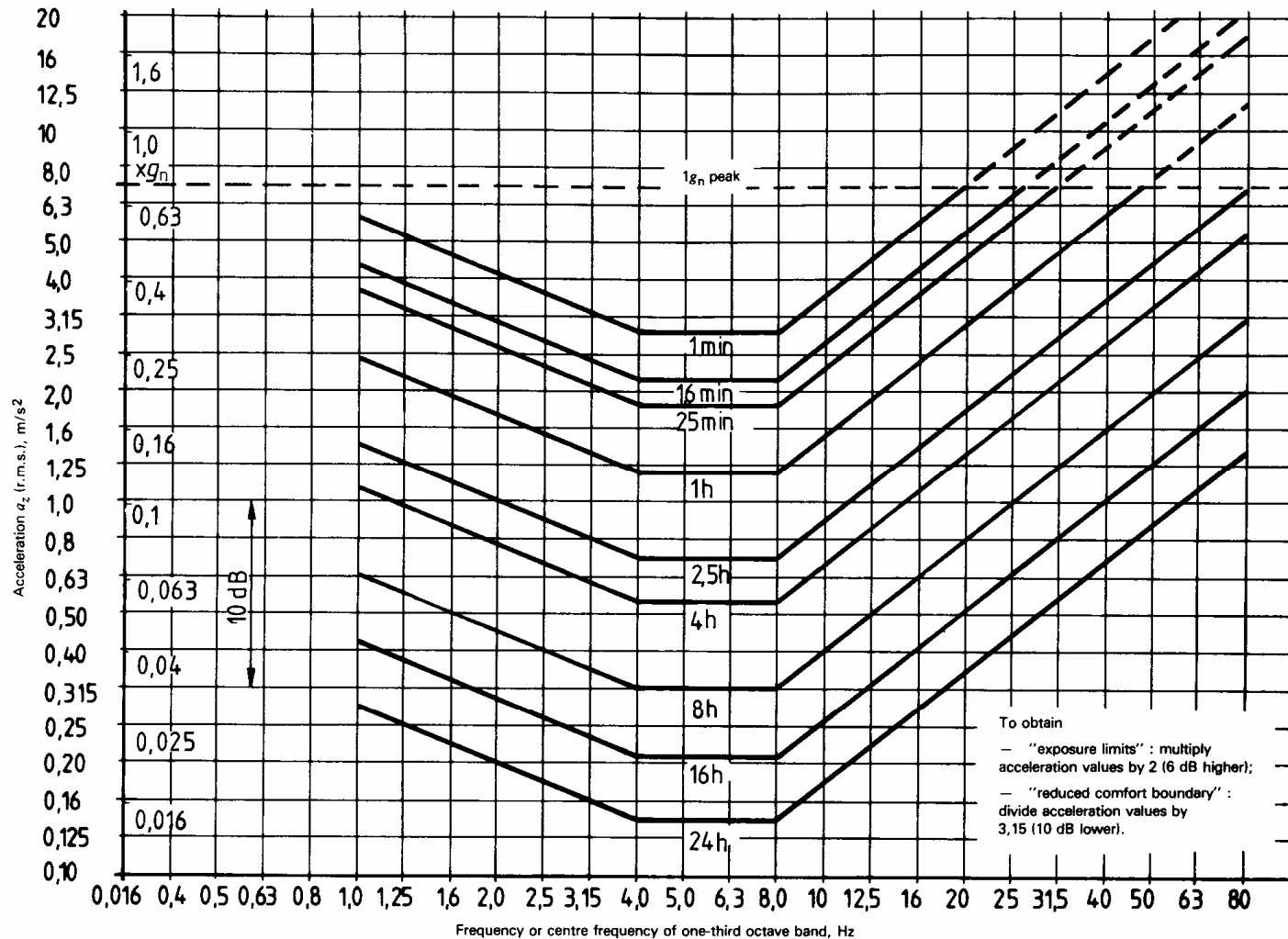
Which vibration levels and exposure times will cause health injuries?

- International Organization for Standardization (ISO-standard)
 - Whole Body Vibration (WBV)
 - ISO 2631
 - Hand-Arm Vibration (HAV)
 - ISO 5349

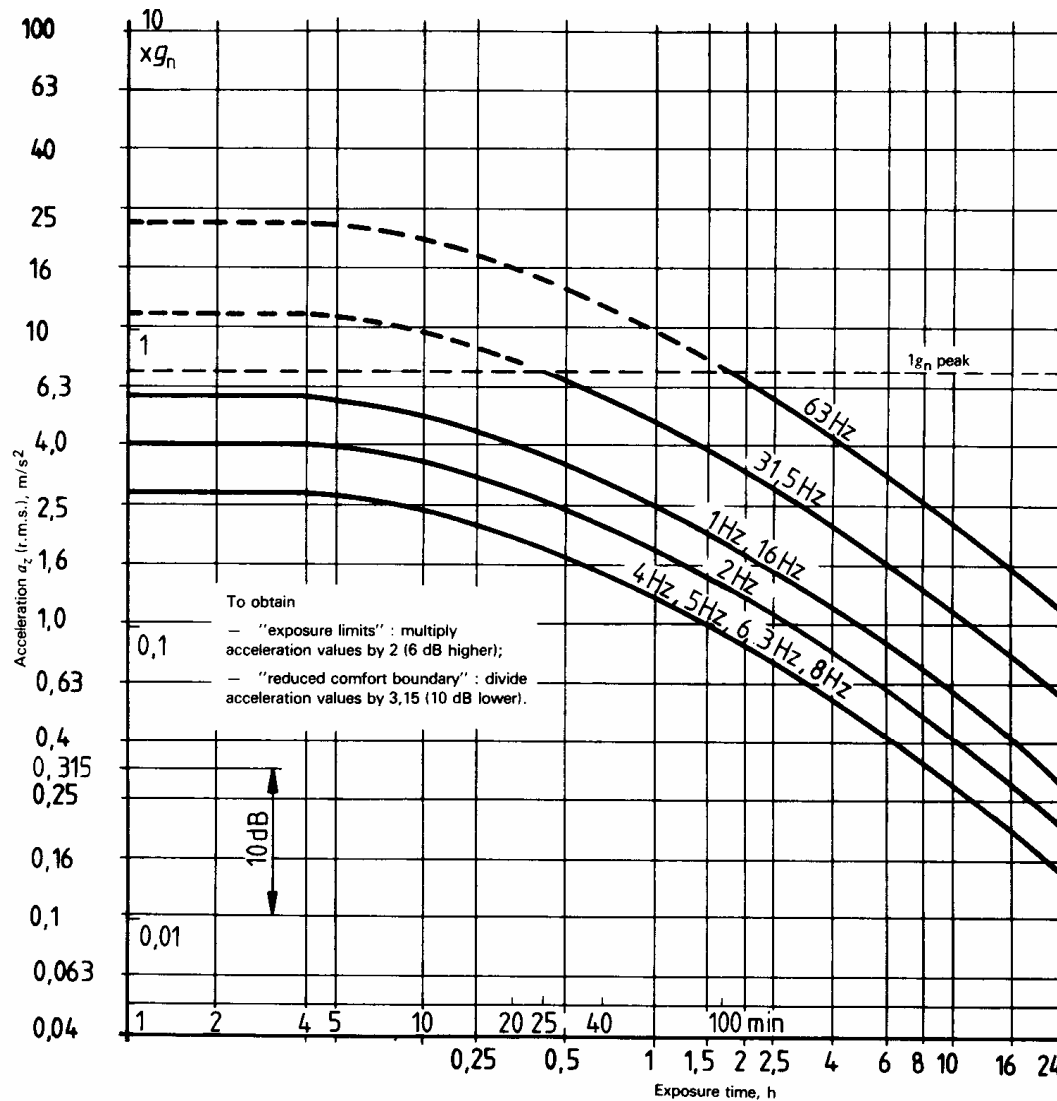
Whole-Body Vibration - Coordinate System



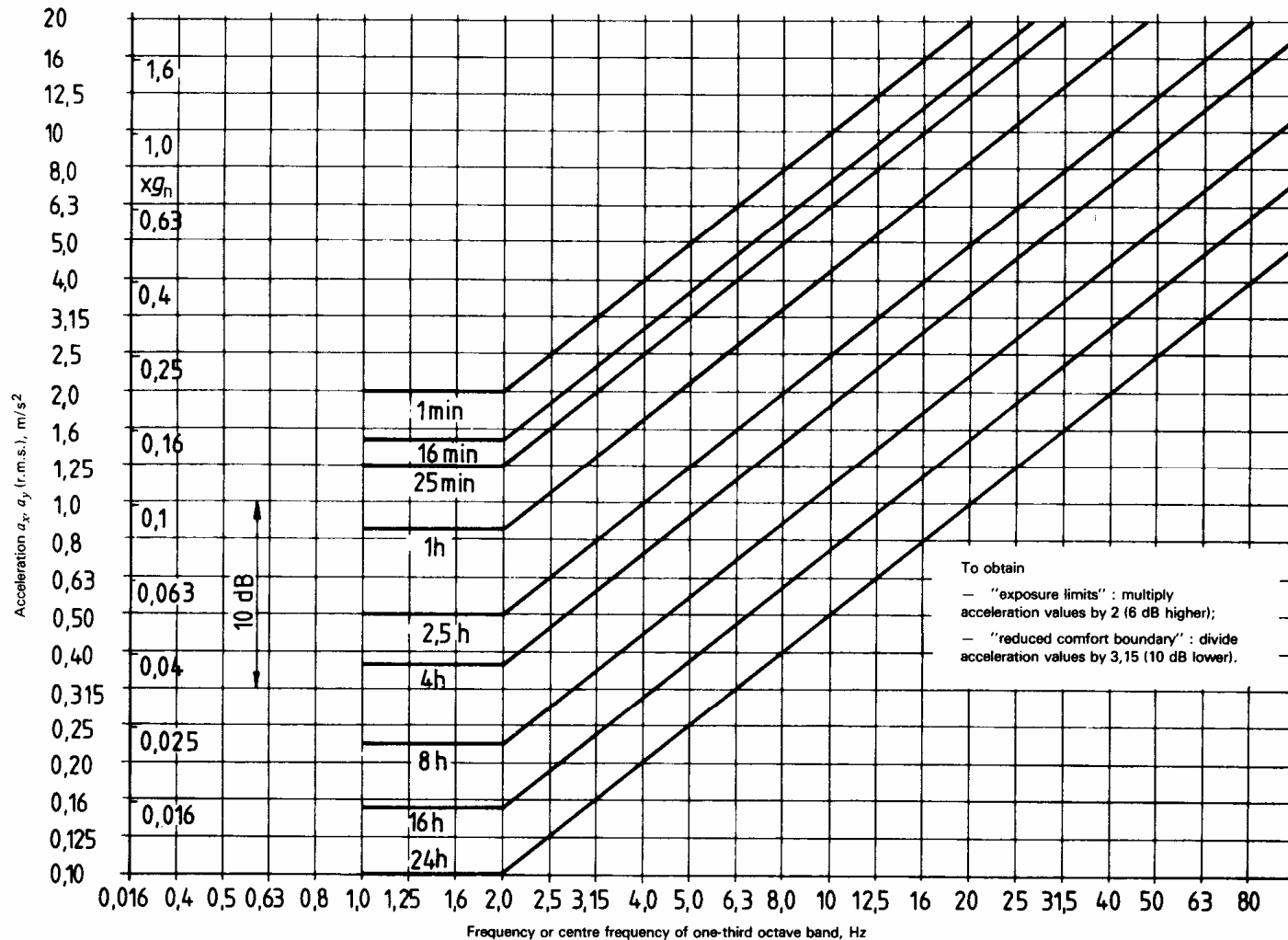
Whole-Body Vibration - Z-Axis



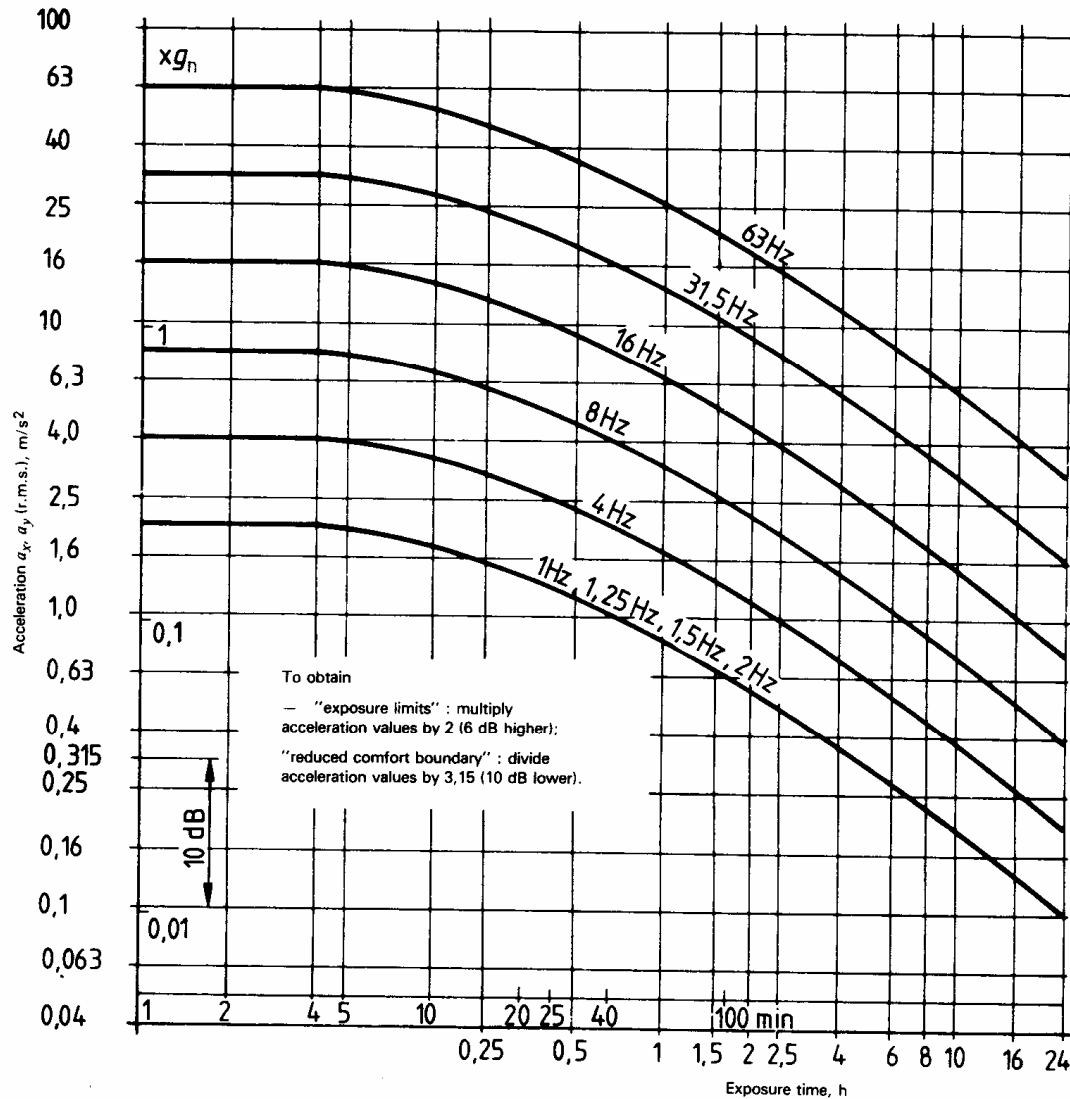
Whole-Body Vibration - Z-Axis



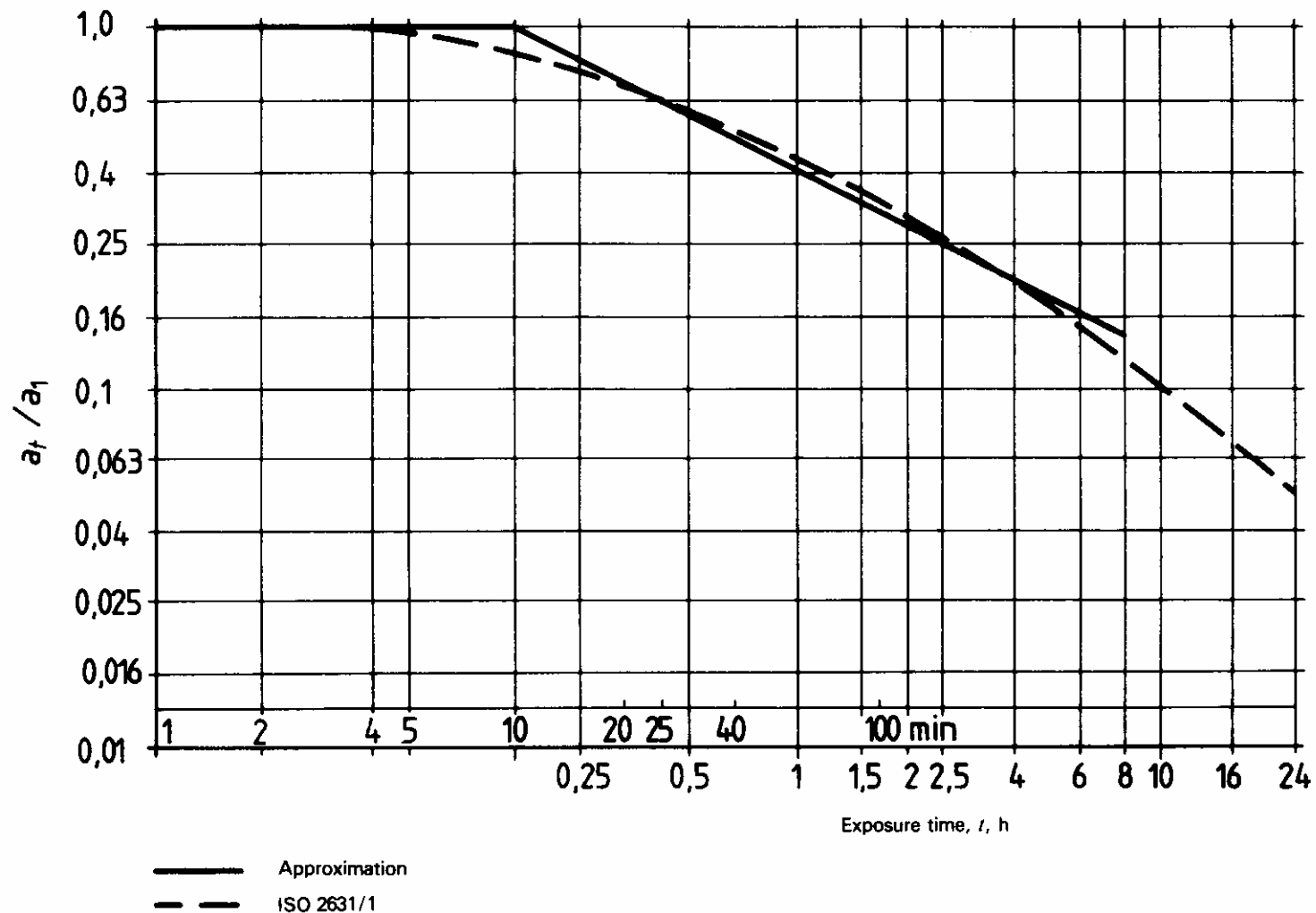
Whole-Body Vibration - X&Y-Axis



Whole-Body Vibration - X&Y-Axis



Ratio a_t/a_1 vs Exposure Time t



Exposure Time of Vibration

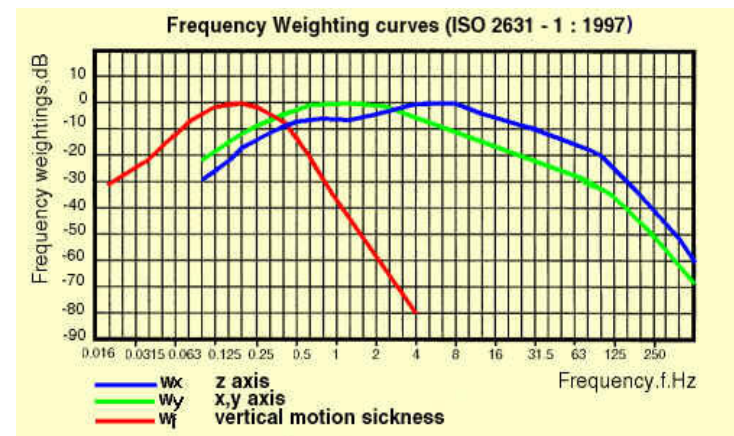
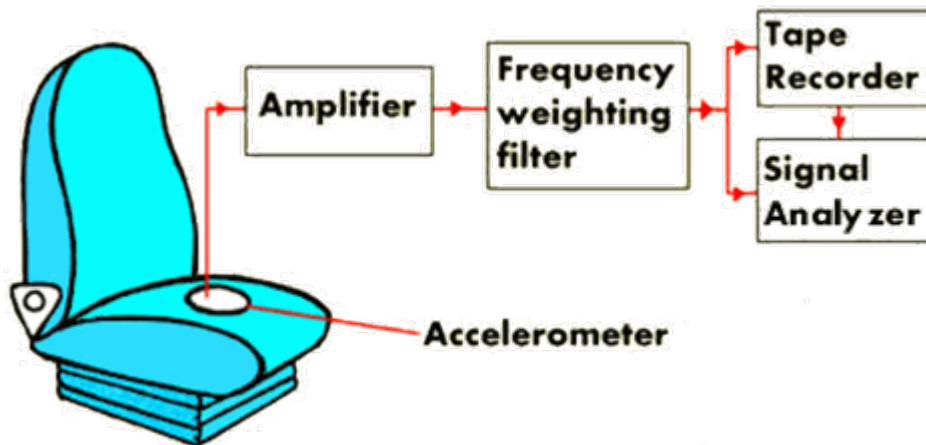
Exposure Time Approximation

$$\begin{aligned} a_t &= a_1 & t < 10 \text{ min} \\ a_t &= a_1 \sqrt{\frac{10 \text{ min}}{t}} & 10 \text{ min} < t < 480 \text{ min} \end{aligned}$$

The “Equivalent Exposure” Dose

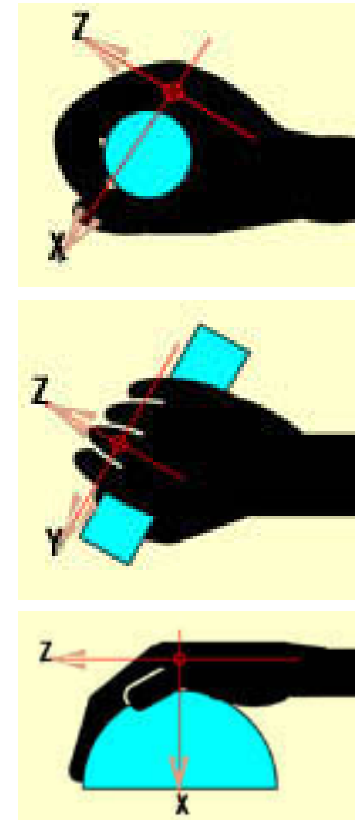
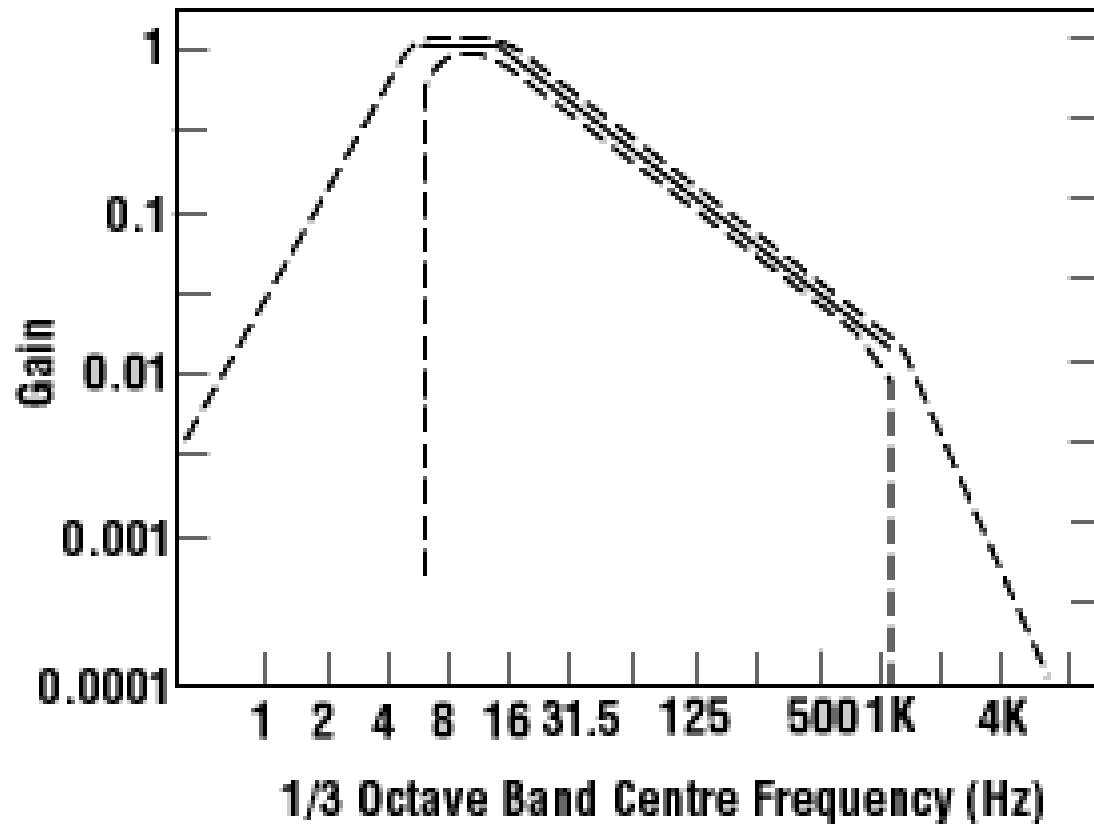
$$D = \sum_i \frac{t_i}{T_i} < 1$$

Whole-Body Vibration - Instrumentation

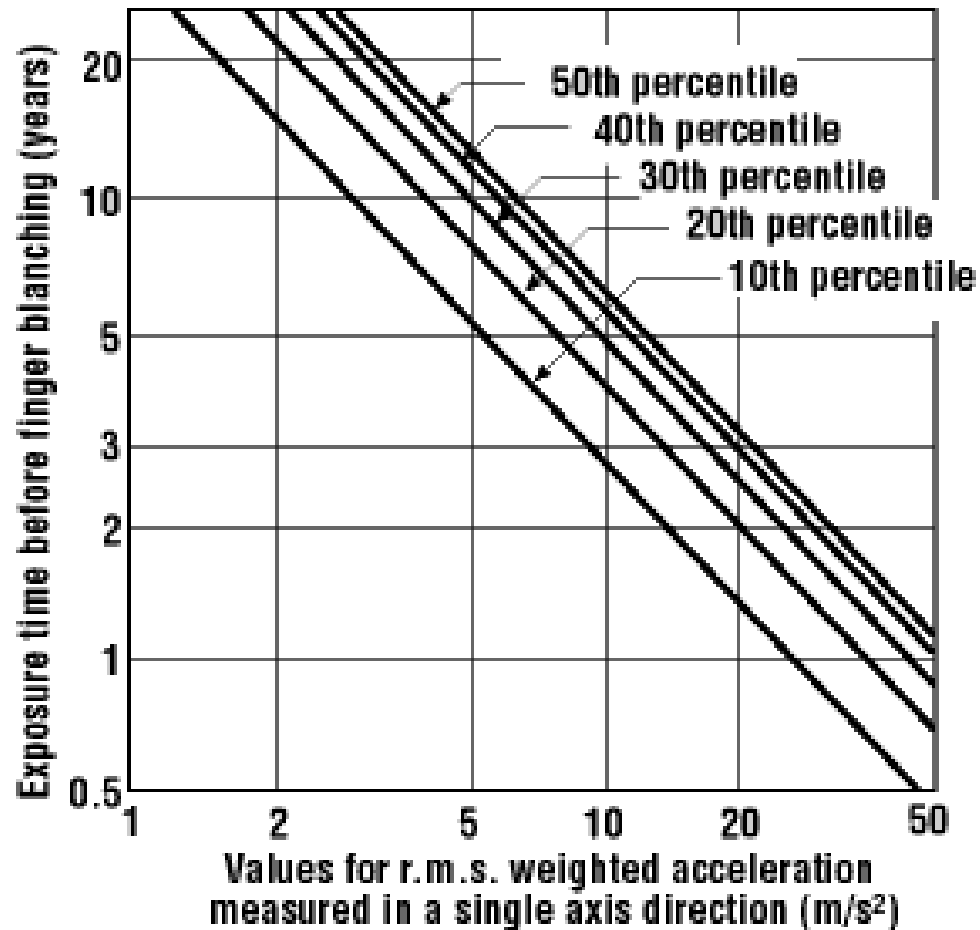


Hand-Arm Vibration – ISO 5349

Frequency weighting curve (ISO 5349)



Hand-Arm Vibration - Exposure Time



Europese richtlijnen – Situatieschets

De richtlijnen richten zich zowel naar werkgevers als naar producenten

Kaderrichtlijn ter bevordering van de verbetering van de veiligheid en de gezondheid van de werknemers op het werk

- ..
- 16e bijzondere richtlijn onder 89/391/EEG
2002/44/EEG blootstelling aan fysische agentia (trillingen)
- 17e bijzondere richtlijn onder 89/391/EEG
2003/10/EEG blootstelling aan fysische agentia (lawaai)

2002/44/EEG trillingen

Algemeen

- Minimale vereisten betreffende veiligheid en gezondheid gerelateerd aan de blootstelling van werknemers aan trillingen
- Deze sociale richtlijn verplicht werkgevers om de risico's naar de werknemers weg te nemen rekening houdend met de beschikbaarheid van maatregelen en met de beschikbare technologische vooruitgang

2002/44/EEG trillingen

Artikel 3 grenswaarden en actiewaarden

Hand en arm trillingen

- **Grenswaarde** voor dagelijkse blootstelling (herleid tot 8u)
 - 5 m/s²
- **Actiewaarde** voor dagelijkse blootstelling (herleid tot 8u)
 - 2.5 m/s²
- De **grenswaarde** mag onder geen enkel beding overschreden worden
- Indien de **actiewaarde** overschreden wordt moeten er maatregelen volgen

2002/44/EEG trillingen

Artikel 3 grenswaarden en actiewaarden

Lichaamstrillingen

- **Grenswaarde** voor dagelijkse blootstelling (herleid tot 8u)
 - 1.15 m/s²
- **Actiewaarde** voor dagelijkse blootstelling (herleid tot 8u)
 - 0.5 m/s²
- De **grenswaarde** mag onder geen enkel beding overschreden worden
- Indien de **actiewaarde** overschreden wordt moeten er maatregelen volgen

Metten van hand-arm trillingen

- Bepaal de waarden van de kwadratische gemiddelden (rms) van de frequentiegewogen versnellingen:

$$a_{hw_x}, a_{hw_y}, a_{hw_z}$$

- Bepaal de blootstelling

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hw_x}^2 + a_{hw_y}^2 + a_{hw_z}^2}$$

2002/44/EEG trillingen

Metten van lichaamstrillingen

- Bepaal de waarden van de kwadratische gemiddelden (rms) van de frequentiegewogen versnellingen:

$$a_{wx}, a_{wy}, a_{wz}$$

- Bepaal de blootstelling

$$a_{hv} = \text{MAX} \left\{ 1.4a_{wx}, 1.4a_{wy}, a_{wz} \right\}$$

Omrekenen naar dagelijkse blootstelling

- Twee verschillende dagelijkse blootstellingen aan lichaamstrillingen zijn equivalent als:

$$a_{w1} \times T_1^{1/2} = a_{w2} \times T_2^{1/2}$$

- Indien de lichaamstrillingsblootstelling bestaat uit verschillende perioden:

$$a_{w,e} = \sqrt{\frac{\sum a_{wi}^2 \times T_i}{\sum T_i}}$$

2002/44/EEG trillingen

Verplichting van werkgevers

- Artikel 4. Bepaling en beoordeling van risico's
- Artikel 5. Maatregelen ter voorkoming of vermindering van de blootstelling
- Artikel 6. Voorlichting en opleiding van werknemers
- Artikel 7. Raadpleging en deelneming van werknemers

2002/44/EEG trillingen

Artikel 4 bepaling en beoordeling van risico's

Beoordelen en *indien nodig* meten

- Observatie van de specifieke werkmethoden
- Gebruik maken van passende informatie over het waarschijnlijke trillingniveau (wettelijke gegevens fabrikanten, databanken)

Arbetslivsinstitutet *Vibration Database*

About the Institute Research Training Publications International Library

NIWL North
-Department of Work and the Physical Environment
National Institute for Working Life

Home

Hand-Arm Vibration
Important Information
Search HAV Database
Exposure Calculator

Whole-Body Vibration
Important Information
Search WBV Database
Exposure Calculator

Important Issues to Consider Before Entering the Hand-Arm Vibration Database

The information stored in this database is compiled from research reports, power tool catalogues, etc. It is however important to consider the following:

- ◆ The responsibility for the correctness of data presented in the database lies solely on the author/authors or the publisher of the specified source of information.
- ◆ NIWL does not take any responsibility for any data input errors.
- ◆ It is up to you, as a user of this information, to consult the original source of information when necessary.
- ◆ NIWL does not take any responsibility on how presented vibration data is used, interpreted or for possible consequences.

The database contains vibration data measured on the handle of power tools during one of two conditions:

- ◆ **Artificial testing in accordance with relevant part of ISO 8662 (i.e., a CE declared vibration level); or**
- ◆ **Actual working conditions in accordance with ISO 5349 (i.e., a field measured level).**

Search HAV Database

Machine Type	Chain saw
Manufacturer	Husqvarna
Model	350
Power Supply	Combustion engine
Power	2,300 Watt
Weight	4.8 kg
RPM	13,000 rpm



Declared CE Values

Vibration Level Control Handle	2.6	m/s^2
Vibration Level Support Handle	2.5	m/s^2
Sound Pressure Level	100	dB(A)
Sound Power Level	107	dB(A)

Reference: www.husqvarna.com

Data modified on 13 December 2001

Exposure Calculator – HAV

Exposure Calculator

for Hand-Arm Vibration



Instructions:

1. Enter vibration levels for each machine. Press "Calculate" to view exposure time for action value and limit value.
2. Enter work time for each machine in hours and/or minutes. Press "Calculate" to view the daily vibration exposure (8 hour work day).

Machine no.	Vibration level (m/s ²)	Exposure time for action value ? 2.5 m/s ² (hours)	Exposure time for limit value ? 5.0 m/s ² (hours)	Daily exposure time		Daily exposure (m/s ²)
				Hours	Min.	
1	<input type="text" value="5.3"/>	1.8	7.1	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="30"/>	1.3
2	<input type="text" value="2.1"/>	More than 8	More than 8	<input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="00"/>	1.8
3	<input type="text"/>	-	-	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-
4	<input type="text"/>	-	-	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-
5	<input type="text"/>	-	-	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-

Total daily exposure: **2.3 m/s²**

Calculate

Reset

Exposure action value and limit value according to EU Directive [2002/44/EG](#).

Search WBV Database

Vehicle	Excavator
Manufacture	Liebherr
Model	A 901 C
Work	Loading of sand
Driver Seat	GN-Chair 81-36
Tyres, Band	Metzler 9.00-20
Roadsurface	Heap of sand
Note	



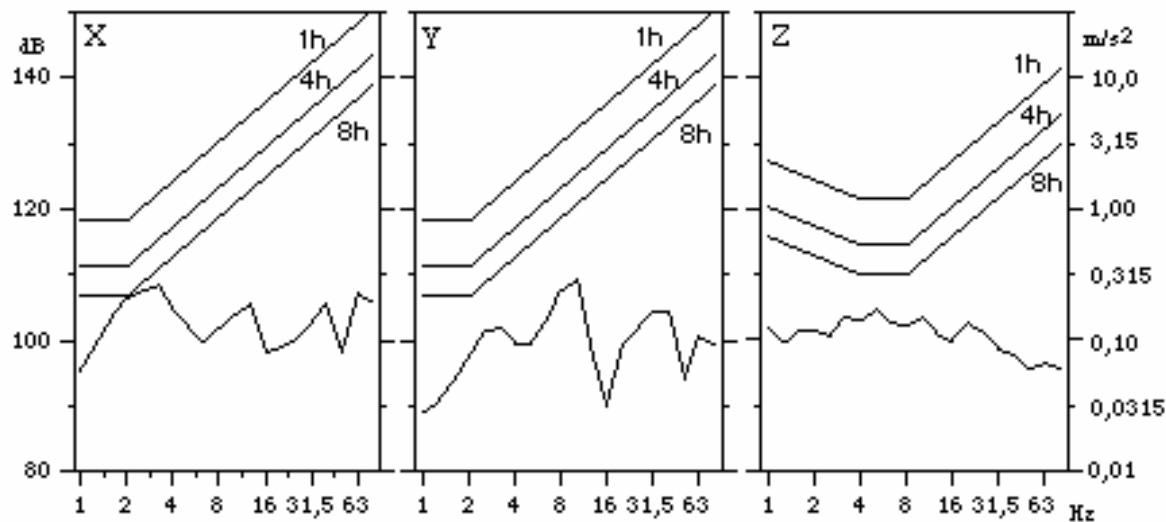
Frequency weighted vibration levels

	$a(x)$	$a(y)$	$a(z)$	
Effective Value RMS	1.3	0.2	0.4	m/s^2
Peak Value	2.2	2.5	2.5	m/s^2
Vector Sum Weighted RMS	0.7			m/s^2

Search WBV Database

Acceleration levels in 1/3-octavebands

This graph also shows limits for fatigue and decreased work capacity for 1, 4 and 8 hours exposure respectively, according to ISO 2631 (1982).



Exposure Calculator – WBV

Exposure Calculator for Whole-Body Vibration



Instructions:

1. Enter vibration levels for each machine. Press "Calculate" to view exposure time for action value and limit value.
2. Enter work time for each machine in hours and/or minutes. Press "Calculate" to view the daily vibration exposure (8 hour work day).

Machine no.	Vibration level (m/s ²)	Exposure time for action value ? 0.5 m/s ² (hours)	Exposure time for limit value ? 1.1 m/s ² (hours)	Daily exposure time		Daily exposure (m/s ²)
				Hours	Min.	
1	<input type="text" value="0.7"/>	4.1	More than 8	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="00"/>	0.5
2	<input type="text" value="1.5"/>	0.9	4.3	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="30"/>	0.4
3	<input type="text"/>	-	-	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-
4	<input type="text"/>	-	-	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-
5	<input type="text"/>	-	-	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-

Total daily exposure: **0.6 m/s²**

Exposure action value and limit value according to EU Directive 2002/44/EG.

2002/44/EEG trillingen

*Artikel 5 Maatregelen bij overschrijding van de **actiewaarde***

Programma van technische en/of organisatorische maatregelen

- Alternatieve werkmethoden
- Hulpmiddelen ter beschikking stellen
- Passend onderhoudsprogramma
- Voorlichting en opleiding
- Beperking van de duur
- ...

2002/44/EEG trillingen

*Artikel 5 Maatregelen bij overschrijding van de **grenswaarde***

Onmiddellijk maatregelen treffen om de blootstelling terug te brengen onder de grenswaarde

Aanpassingen aan de bron

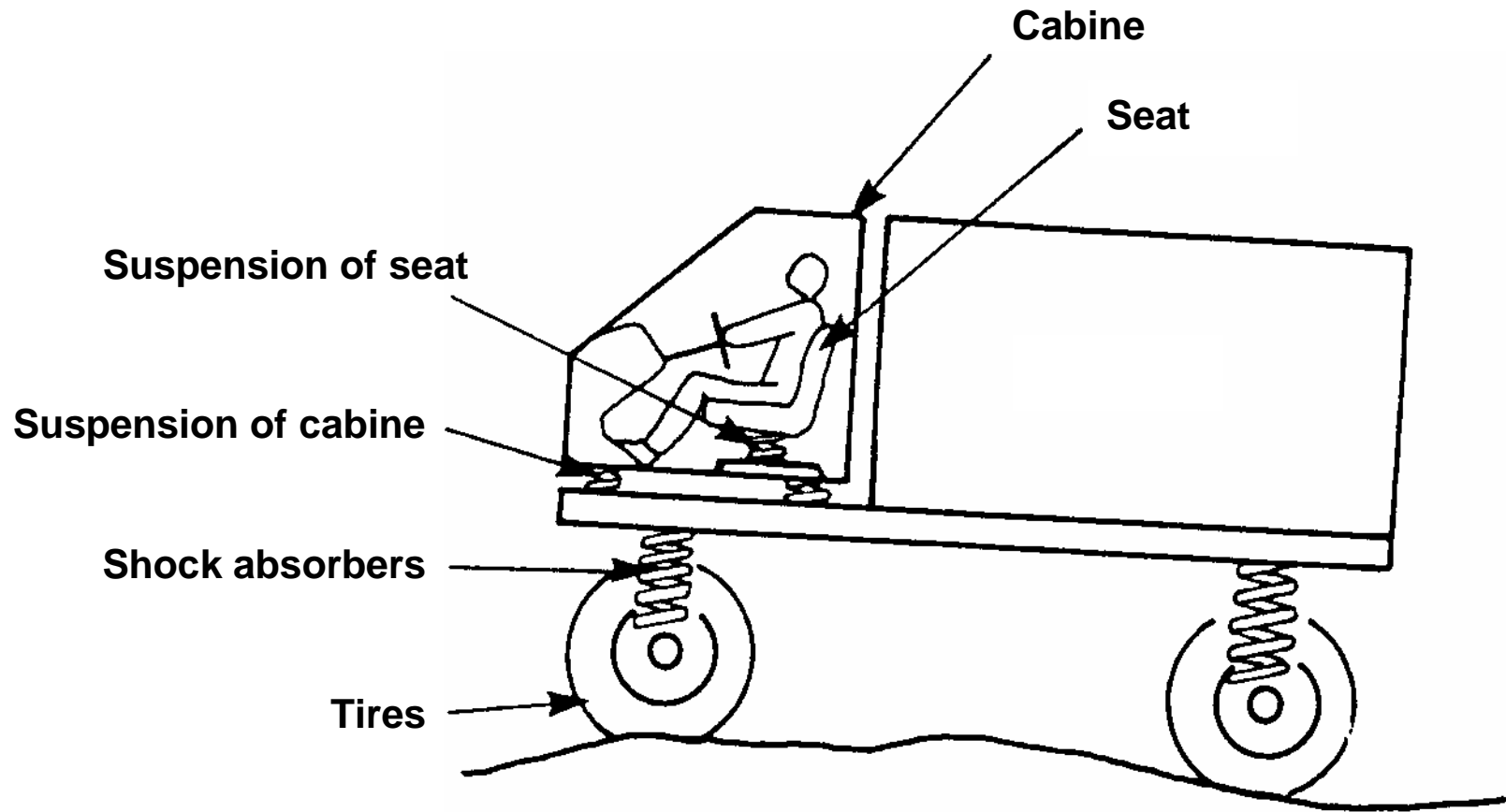


Atlas Copco

Bvb. slijpschijven

- Gebruik van slijpschijven met een lichte onbalans (duurder in aankoop)
- Met kleinere toleranties bij het uitboren (0,3 à 0,2 mm)
- Zogenaamde "stille" slijpschijven
 - dewelke het geluidsniveau effectief met 10 dB(A) verminderen
 - maar geen invloed hebben op de opgewekte trillingen.

Trillingsdemping – WBV



Trillingsdemping – HAV

Een ophangingsstelsel bestaat uit soepele (geen starre) bevestigingen tussen de verschillende onderdelen, om zo de overdracht van trillingen tussen deze onderdelen te verminderen.

Bij een trillende machine zijn dat:

- de ophanging van de handvatten (trilvrije handvatten)
- trillingsdempende handschoenen, ...



Trillingsdempende handvaten

- Enkel trillingen boven de 200 Hz kunnen hierdoor gedempt worden
- Om trillingen lager dan 200 Hz te dempen moet het handvat al zo dik met verend materiaal overtrokken worden dat het onmogelijk is het werktuig nog goed in de hand te houden
- Wel wordt op deze manier rechtstreeks contact met een koud metalen handvat vermeden. Hierdoor vermindert het risico op vaataandoeningen.
- Ze zijn nuttig voor bvb. slijpmachines: dempen de trillingen met 30 tot 80%
- Bij percussiemachines (klopboormachines, steenboren) hebben ze geen of zelfs een omgekeerd effect.

Onderhoud van de machine

Regelmatig onderhoud door een bevoegd technicus

Nazicht van de verschillende onderdelen, in het bijzonder het antitrillingssysteem

Onderdelen vervangen vóór ze breken, om de machine in goede staat te houden

- een beschadigde machine werkt minder doeltreffend (met een langere blootstellingsduur als gevolg) en veroorzaakt 2 tot 4 keer meer trillingen

Opleiding van de operators:

- keuze van het werktuig
- onderhoud van het werktuig (slijpen, aanscherpen, ...)
- gebruik van de machine: houding, greep, uit te oefenen druk, ...