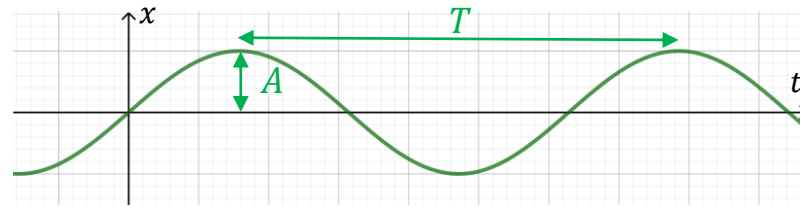


Värähdysliike

- Värähdysliike
 - Värähtely on liikettä, jossa värähtelyyn osallistuvien rakenneosien etäisyydet vaihtelevat jaksollisesti.
- Värähdysliikkeen perussuureet
 - *Amplitudi* A on kappaleen suurin poikkeama tasapainoasemasta



- *Jaksonaika* T on kappaleen edestakaisen heilahduksen kesto.
 - *Taajuus* f on värähdysliikkeen jaksonajan käänteisarvo $f = \frac{1}{T}$
 - Taajuus ilmoittaa, kuinka monta värähdystä tapahtuu tietyssä ajassa.
- *Resonanssi* on ilmiö, jossa värähtelijä saa toisen värähtelijän värähtelemään tämän ominaistaajuudella

Harmoninen voima

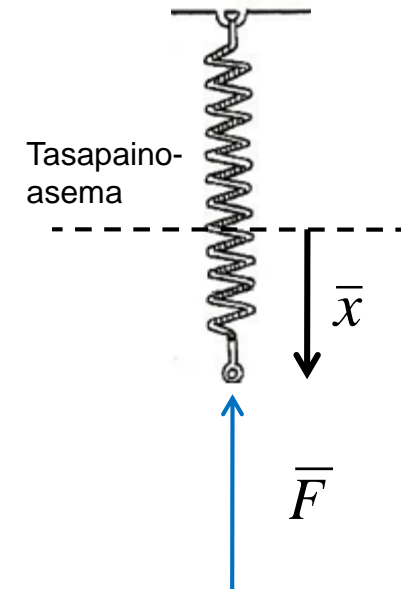
- Jos voima on suoraan verrannollinen poikkeamaan tasapainoasemasta ja kohti tasapainoasemaa, voimaa sanotaan *harmoniseksi* ja se saadaan yhtälöstä

$$\bar{F} = -k\bar{x}$$

jossa k on *jousivakio* (kuvaa jousen jäykkyyttä) ja x on poikkeama tasapainoasemasta.

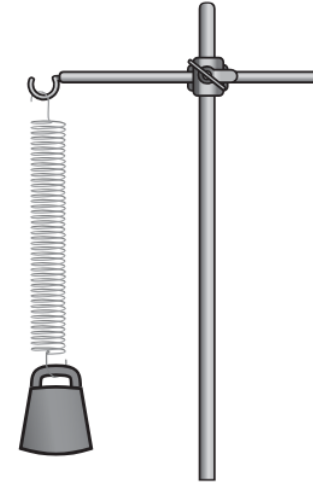
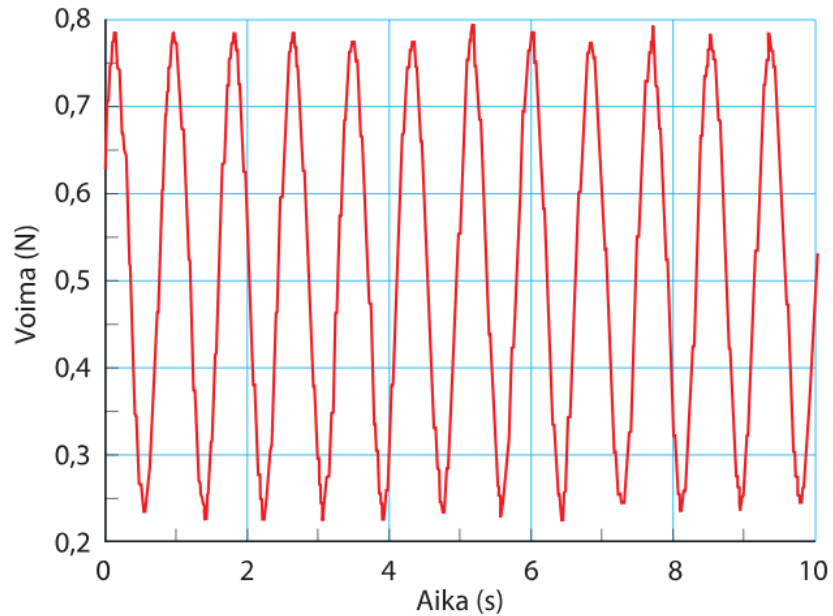
- Harmoninen voima \bar{F} ja poikkeama \bar{x} ovat aina vastakkaissuuntaisia.
- Harmonisessa liikkeessä olevan kappaleen värähtelyn jaksonaika T saadaan yhtälöstä

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$



m = kappaleen massa
 k = jousen jousivakio

K2005/15 Kevyt jousi ja punnus ripustettiin kuvan mukaisesti tietokoneeseen liitettyyn voima-anturiin. Kun punnus saatettiin värähtelemään pystysuunnassa, saatiin tietokoneen näytölle oheinen kuvaaja. Määritä mittauksen perusteella jousen jousivakio.



Jousivakio voidaan ratkaista harmonisen värähtelijän jaksonajan kaavan $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ avulla, koska jaksonaika T ja punnuksen massa m pystytään määrittämään kuvaajan perusteella.

Jousivakion kaavaksi saadaan $k = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$.

Kymmeneen heilahdukseen kuuluu kuvaajan perusteella aika $T_{10} \approx 8,4$ s, joten jaksonaika on

$$T = \frac{8,4 \text{ s}}{10} = 0,84 \text{ s}.$$

Punnus (ja jousi) värähtelevät symmetrisesti tasapainoaseman ympärillä. (Jännitysvoima on suurimmillaan kun punnus on alhaalla.)

Tasapainoasemaa vastaa siis voiman arvo 0,5 N.

Newtonin II lain mukaan $\sum \vec{F} = m\vec{a}$.

Tasapainoasemassa jousen vaikuttava kokonaisvoima (ja kiihtyvyys) on nolla, jolloin jousivoima \vec{F} ja painovoima \vec{G} kumoavat toisensa:

$$\vec{F} + \vec{G} = 0$$

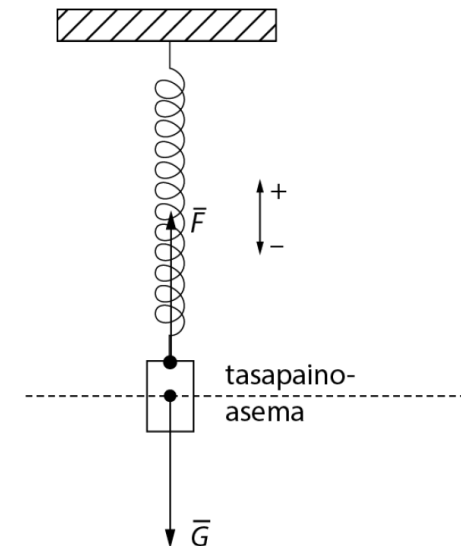
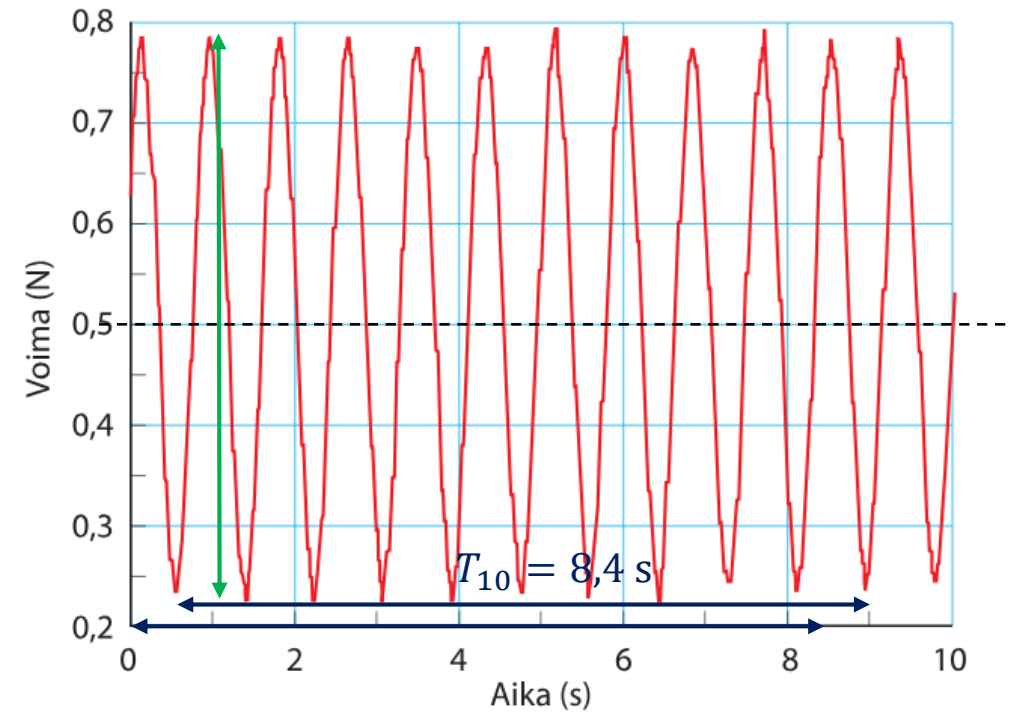
Skalaarimuodossa (suunta ylös on positiivinen):

$$F - G = F - mg = 0$$

Punnuksen massa on siis

$$m = \frac{F}{g} = \frac{0,5 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2} \approx 0,051 \text{ kg}$$

ja jousivakio $k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 0,051 \text{ kg}}{(0,84 \text{ s})^2} \approx 2,9 \frac{\text{N}}{\text{m}}$.



Aaltoliike

- Aaltoliikettä, joka tarvitsee edetäkseen väliaineen, sanotaan *mekaaniseksi aaltoliikkeeksi*.
 - Syntyy aineeseen kun sen tasapainotilaa häiritään
 - Aine itse ei etene, mutta aallon mukana siirtyy energiaa
- *Sähkömagneettinen aalto* etenee sekä väliaineessa, että tyhjiössä sähkömagneettisten kenttien aaltoliikkeenä.

- Poikittainen aaltoliike

- Värähtelyt tapahtuvat aallon etenemissuuntaa vastaan kohtisuorassa tasossa

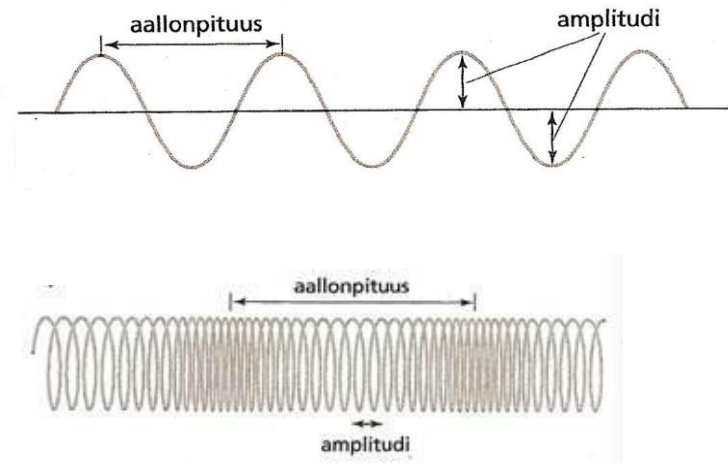
- Pitkittäinen aaltoliike

- Värähtelyt tapahtuvat aallon etenemissuunnassa (tihentyminä ja harventumina)

- Aaltoliikkeen perusyhtälö

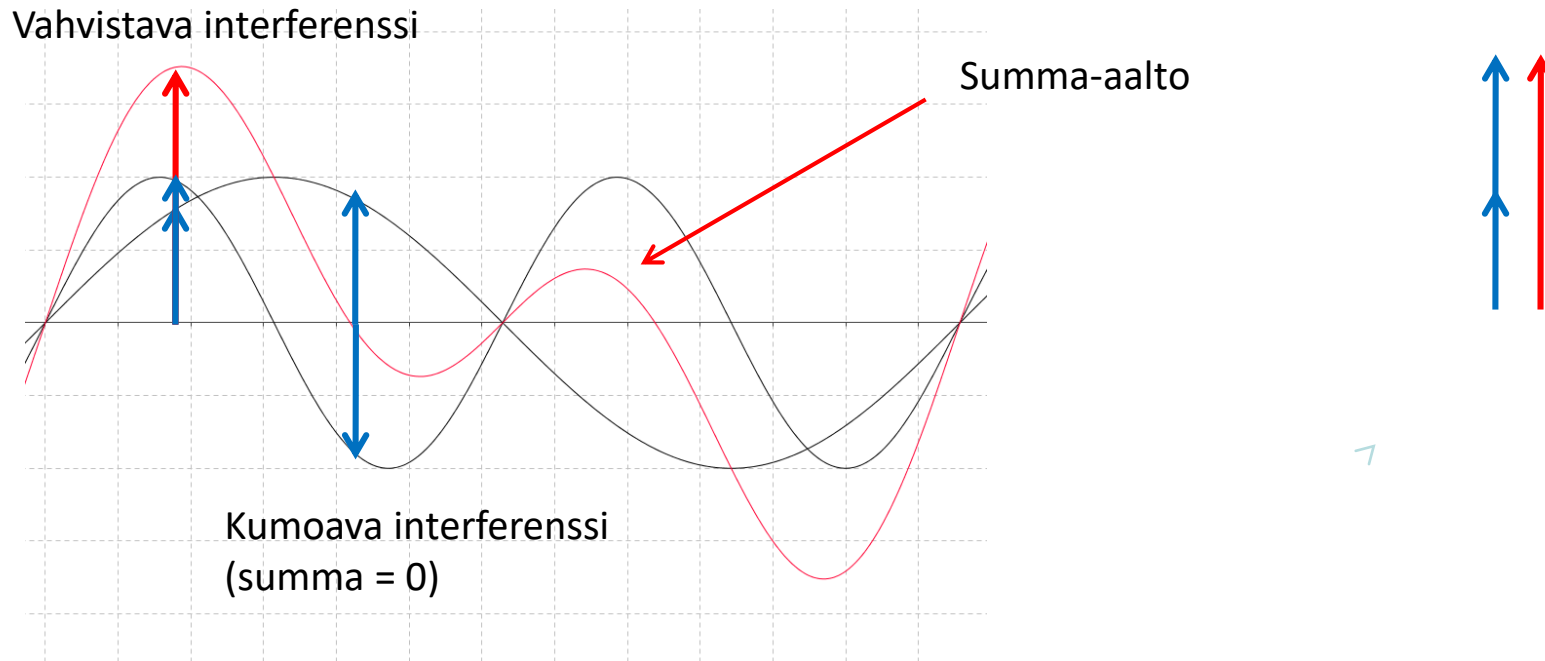
$$v = \lambda f$$

- Aallon etenemisnopeus on aallonpituuden λ ja taajuuden f tulo



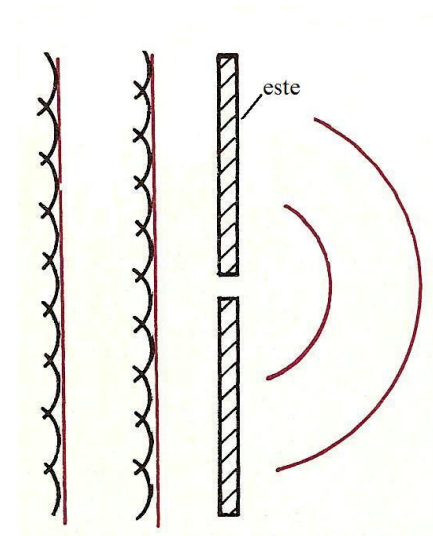
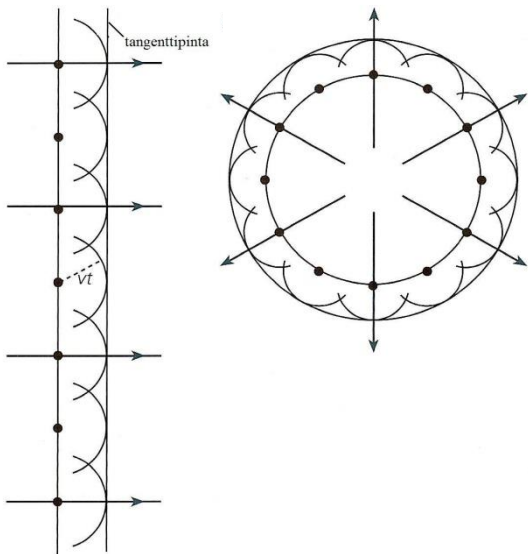
Aaltojen interferenssi

- Kun aallot kohtaavat, havaitaan niiden yhteisvaikutus. Aaltojen yhteisvaikutusta sanotaan *interferenssiksi*.
- Superpositioperiaate:
 - Kun kaksi tai useampia aaltoja etenee samassa väliaineessa, aaltojen yhteisvaikutus missä tahansa pisteessä on yksittäisten aaltojen summa.



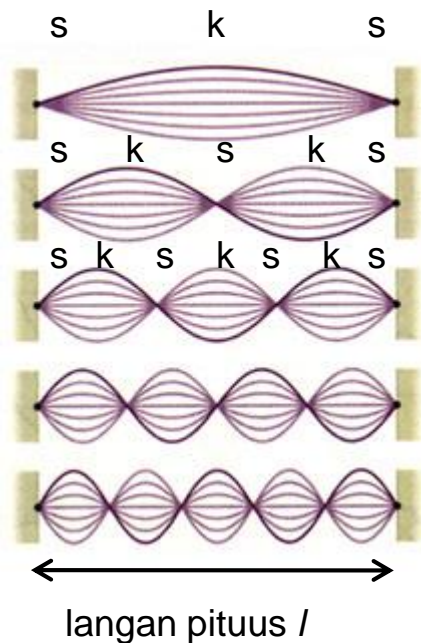
Aaltojen diffraktio

- Huygensin periaate
 - Jokainen aaltorintaman piste on uuden alkeisaallon (palloaallon) lähde. Interferoidessaan alkeisaallot muodostavat uuden aaltorintaman
- *Diffraktio* tarkoittaa esteen aiheuttamaa aaltoliikkeen taipumista



Seisova aaltoliike

- Syntyy kahden vastakkaiseen suuntaan etenevän samanlaisen aallon vahvistaessa toisiaan (interferenssi)
- Ei etene eikä kuljeta energiaa, sillä värähtelijät liikkuvat vain pystysuunnassa
- Voi synnyttää ääniaaltoja (jotka puolestaan kuljettavat energiaa)
- Esimerkkinä värähtelevä (kitaran) kieli:
 - Paikallaan pysyviä kohtia kutsutaan *solmuiksi* (s)
 - Solmujen välissä on *kupuja* (k)



Perusvärähtely: $l = \frac{\lambda}{2}$

Perustaajuus f_0

*Taajuus ja aallonpituus ovat
kääntäen verrannollisia, kun
 $v = \text{vakio}$*

1. ylävärähtely $l = \lambda$

$f_1 = 2f_0$ (1. yläsävel)

2. ylävärähtely $l = \frac{3}{2}\lambda$

$f_2 = 3f_0$ (2. yläsävel)

3. ylävärähtely $l = 2\lambda$

$f_3 = 4f_0$ (3. yläsävel)

4. ylävärähtely $l = \frac{5}{2}\lambda$

$f_4 = 5f_0$ (4. yläsävel)

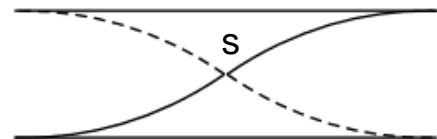
jne.

Seisova aalto ilmapatsaassa

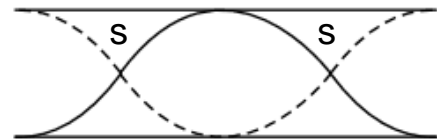
- Putkeen johdettu ääni saa ilman molekyylit värähtelemään
 - Syntyy seisova aalto, kun pitkittäiset aallot interferoivat
- Solmukohdissa ilman molekyylit pysyvät paikallaan
 - Paine-ero on suurimmillaan, koska viereisten kupujen värähtelevät ilmamolekyylit liikkuvat vuoroin kohti ja poispäin solmukohdasta (vrt. mäntä)
- Kupujen kohdalla molekyylien liike on suurinta ja paineen vaihtelut pienimmillään
- Putken avoimeen päähän muodostuu kupu, koska siellä paine on aina sama kuin ulkoinen ilmanpaine

Seuraavissa piirroksissa ilman värähtelyä kuvataan havainnollisuuden vuoksi poikittaisena aaltoliikkeenä:

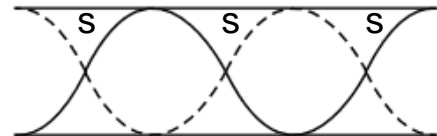
Molemmista päistä avoin putki (pituus = l)



$$l = \frac{\lambda}{2} \quad f_0$$

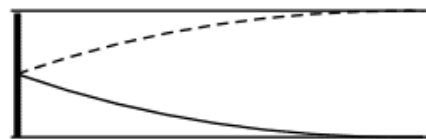


$$l = \lambda \quad f_1 = 2f_0$$

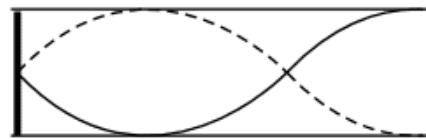


$$l = \frac{3}{2}\lambda \quad f_2 = 3f_0$$

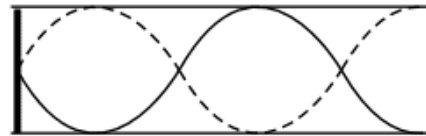
Puoliavoin putki (pituus = l)



$$l = \frac{\lambda}{4} \quad f_0$$



$$l = \frac{3}{4}\lambda \quad f_1 = 3f_0$$

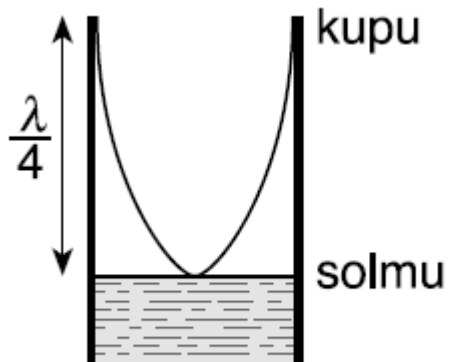


$$l = \frac{5}{4}\lambda \quad f_2 = 5f_0$$

Esimerkki:

Putkessa olevan veden pintaa voidaan alentaa. Oppilastyössä äänigeneraattorilla tuotetaan 440 Hz taajuista ääntä, joka johdetaan kaiuttimen avulla putkeen. Ensimmäinen äänen voimakkuuden maksimi syntyy, kun veden pinnan ja putken suulla olevan kaiuttimen välinen etäisyys on 18 cm. Piirrä kuva putkeen syntyvästä aaltoliikkeestä ja laske äänen nopeus ilmassa.

Putkeen syntyvässä seisovassa aallossa putken avoimessa päässä on kupu (painevaihtelujen minimi) ja veden pinnassa solmu (painevaihtelujen maksimi). Ensimmäinen äänen voimakkuuden maksimi (eli perustaajuus) syntyy kuvan tilanteessa. Ilmapatsaan korkeus on $h = \lambda/4$, joten aallonpituus on



$$\lambda = 4d = 4 \cdot 0,18 \text{ m} = 0,72 \text{ m}$$

Aaltoliikkeen perusyhtälön avulla äänen nopeudeksi ilmassa saadaan

$$v = \lambda f = 0,72 \text{ m} \cdot 440 \text{ Hz} \approx 320 \text{ m/s}$$

Ääni

- Ilmassa etenevää *pitkittäistä* aaltoliikettä
- Ääni on sitä korkeampi, mitä suurempi on äänen taajuus
 - Ultraääni yli 20 kHz, infraääni alle 20 Hz
- Dopplerin ilmiö:
 - Havaittu äänen (aaltoliikkeen) taajuus riippuu havaitsijan, aaltolähteen ja aaltoliikkeen nopeudesta aaltoliikettä kuljettavaan väliaineeseen nähden
- Äänen intensiteetti
 - Intensiteetti I = kohtisuoralle pinnalle tuleva äänitehon P määrä pinta-alaa A kohti
 - $I = \frac{P}{A}$, $[I] = \text{W/m}^2$
 - intensiteettitaso $L = 10 \lg \frac{I}{I_0}$ (dB)
 - Asteikko on logaritminen. Tämä vastaa paremmin ihmisen kuulohavaintoa äänen voimakkuudesta