Fysica 1 – Prof dr Ans Baeyens

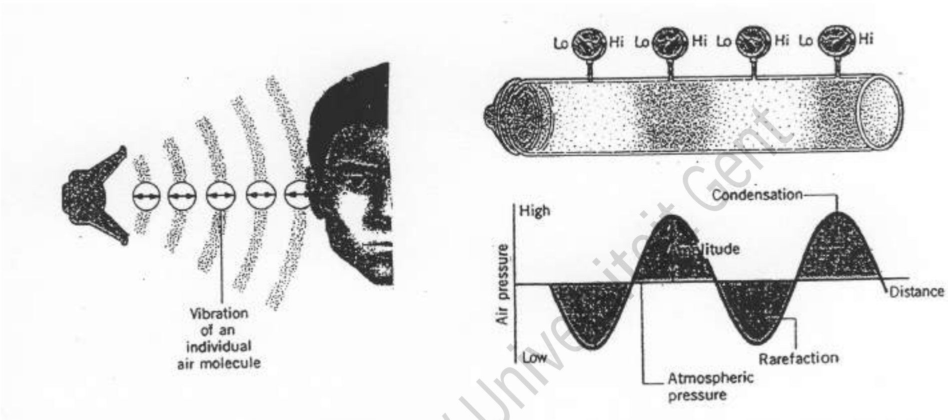
Academiejaar 2020-2021

Inhoudstafel

Hoofdstuk 3. Geluid en gehoor

3.1. Wat is geluid ?

Geluidsgolven zijn **longitudinale mechanische golven**, die zich voortplanten in vaste, vloeibare en gasvormige media. De aanwezigheid van een medium is noodzakelijk. De geluidsgolven zijn het **resultaat van een oscillerende beweging van de deeltjes** van het medium **in de voortplantingsrichting** van de golf. Door deze oscillerende beweging ontstaan bij gasvormige media lokale verdichtingen en verdunningen van het medium, die zich voortplanten zoals weergegeven in de figuur voor de voortplanting van geluid van een luidspreker in lucht naar het oor van een luisteraar.

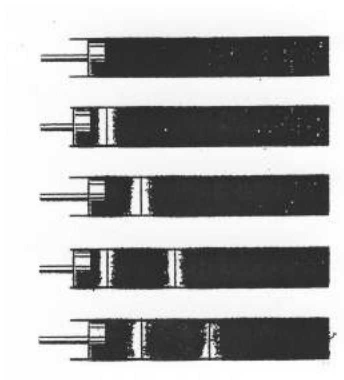


Op de plaats van de verdichtingen is de druk hoger, op de plaats van de verdunningen is de druk lager dan de normale (atmosfeer) druk. Een momentopname van de **luchtdruk** in de voortplantingsrichting van de golf toont een **sinusoïdaal verloop** voor het geval van een **enkelvoudige trilling** (zuivere toon). De afstand tussen twee maxima of minima is de golflengte. Mathematisch wordt dit verloop beschreven door:

$$P(t) = P_m \sin \frac{2\pi}{\lambda} x$$

met **P_m de amplitude van de drukgolf**.

Hoe de drukgolf zich voortplant met de tijd is voorgesteld in nevenstaande figuur. Hierbij beschouwen we geluidsgolven geproduceerd door een oscillerende beweging van een zuiger in een buis (zoals de conus van een luidspreker). De verschillende momentopnamen tonen hoe de periodieke drukgolven zich voortplanten in het medium in de buis.



Beschouwt men het **drukverloop** in een bepaald punt **als functie van de tijd** dan heeft men eveneens een **sinusoidaal verloop met een bepaalde periode en een bijhorende frequentie.**

Geluidsgolven zijn dus **longitudinale lopende *<u>druk</u>*golven**. Mathematisch kan dus de tijds- en plaatsafhankelijkheid van een enkelvoudige geluidsgolf voorgesteld worden door:

$$P = P_m \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

of

$$P = P_m \sin(kx - \omega t)$$

met het golfgetal k = 2π/λ en de hoekfrequentie ω = 2πf gedefinieerd zoals in vorig hoofdstuk.

De **golflengte** λ en de **frequentie f** zijn **verbonden via de snelheid v** van de geluidsgolf

$$\lambda = \frac{\mathrm{v}}{\mathrm{f}}$$

De **snelheid van geluidsgolven** is groter in vloeistoffen dan in gassen, en in vaste stoffen groter dan in vloeistoffen. Ze bedraagt 343 m/s in lucht (20°C) , 1525 m/s in water (20°C), 4040 m/s in bot.
Dit is **<u>niet</u> de snelheid van de moleculen** die de geluidsgolf dragen. Deze **moleculen** van de lucht of een ander medium bewegen ten opzichte van de evenwichtstoestand heen en weer, voeren ten opzichte van de evenwichtstoestand een eenvoudige harmonische oscillatie uit: ze zijn de **dragers van de geluidsgolf** doch worden niet meegevoerd door de drukgolf!!

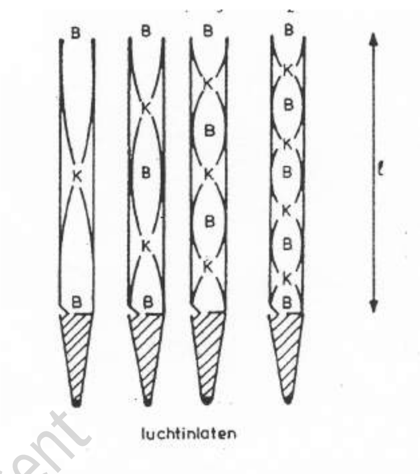
Geluidsgolven in een **frequentiegebied tussen 20 en 20 000 Hz** zijn waarneembaar via het gehoor bij mensen. Is de frequentie hoger dan 20 kHz, dan spreekt men van *ultrageluid.* Is de frequentie lager dan 20 Hz, dan spreekt men over *infrasone geluidsgolven*.

Met toenemende leeftijd daalt de bovenfrequentie naar 13 000 Hz. De **amplitude P_m** is bepalend voor **de luidheid** van de toon. De **toonhoogte** wordt voornamelijk bepaald door de **frequentie.**

3.2. Staande longitudinale golven

In een buis met al dan niet één eind gesloten kunnen **staande longitudinale golven** optreden als de golven een golflengte hebben overeenkomstig de natuurlijke golflengten van de buis als resonator.

Beschouwen we eerst **een buis met beide uiteinden open**. Door interferentie van de heengaande en de gereflecteerde golf ontstaan dan staande golven. Aan **beide uiteinden** zijn de luchtmoleculen compleet vrij zodanig dat daar een **verplaatsingsbuik** gaat optreden.
Hebben we een buis met lengte l dan krijgen we een eerste staande golf wanneer een halve golflengte gelijk is aan de lengte van de buis. Hiermee correspondeert de **eigenfrequentie van de grondtoon**



$$f_1 = \frac{1}{2l}\text{v}$$

Een tweede staande golf treedt op wanneer de golflengte gelijk is aan de lengte van de buis. Hiermee correspondeert de **frequentie van de tweede harmoniek**

$$f_2 = \frac{1}{l}\text{v}$$

De **frequentie van de n^e harmoniek** wordt gegeven Door:

$$f_n = \frac{n}{2l}\text{v}$$

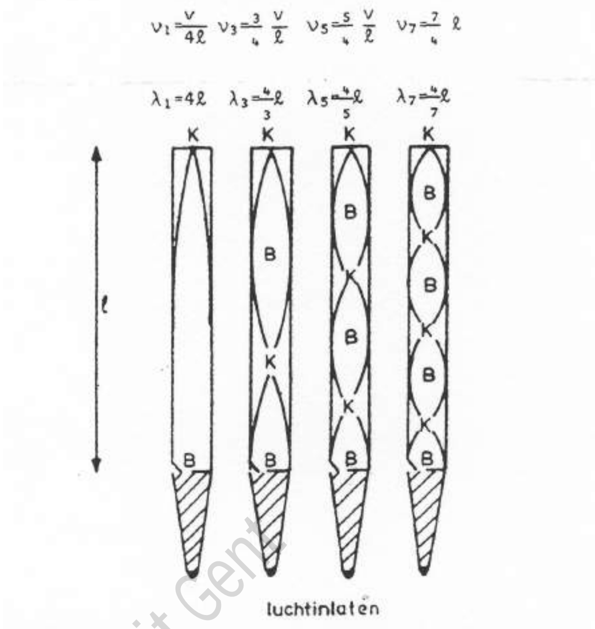
De staande golven van de vier eerste harmonieken voor een open orgelpijp zijn hierboven afgebeeld.

De trillingen van de lucht in de buis worden opgewekt door een wervelende luchtstroom nabij de rand van de buis. Dit geldt voor de orgelpijp, blokfluit, piccolo enz. Bij de laatste twee instrumenten bekomt men lagere frequenties (lagere tonen) door l te verlengen via het dichthouden van openingen.

Beschouwen we nu een **buis met één zijde gesloten**. Aan het **open uiteinde** zal dan een **verplaatsingsbuik** optreden. Aan het **gesloten uiteinde** kan de lucht niet bewegen zodat daar een **verplaatsingsknoop** gaat optreden (analoog als een transversale staande golf).

De eerste staande golf zal optreden wanneer de golflengte vier maal de lengte l van de buis bedraagt.
Hiermee correspondeert een **grondtoon frequentie**:

$$f_1 = \frac{1}{4l}\mathrm{v}$$



De frequentie van de **derde harmoniek** wordt gegeven door:

$$f_3 = \frac{3}{4l}\mathrm{v}$$

De frequentie van de **2n+1^e harmoniek** wordt gegeven door

$$f_{2n+1} = \frac{2n+1}{4l}\mathrm{v}$$

De tweede, vierde en alle **even harmonieken ontbreken** in het geval van een buis met één zijde gesloten.

3.3. Zwevingen

Wanneer twee golven met **nagenoeg dezelfde frequenties** door hetzelfde gebied gaan, ontstaan **tijdsafhankelijke interferenties** of **zwevingen**. Er ontstaat dan een samengestelde golf met een ***amplitude*** die ***varieert in de tijd***. Zwevingen treden bijvoorbeeld op bij het stemmen van een gitaar wanneer men dezelfde noot wenst te spelen op twee opeenvolgende snaren (bv. de hoogste E snaar zonder induwen van de snaar en de daaronder gelegen B snaar bij de vijfde fret). Men genereert dan twee tonen die in frequentie weinig van elkaar verschillen.

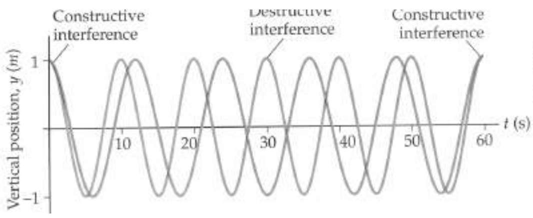
Wiskundige voorstelling van een zweving

Op een bepaalde plaats in de ruimte (dus **x=constant**) komen de twee golven voorbij met **nagenoeg dezelfde** golflengte:

$$y_1(t) = A\sin\omega_1 t$$

en

$$y_2(t) = A\sin\omega_2 t$$

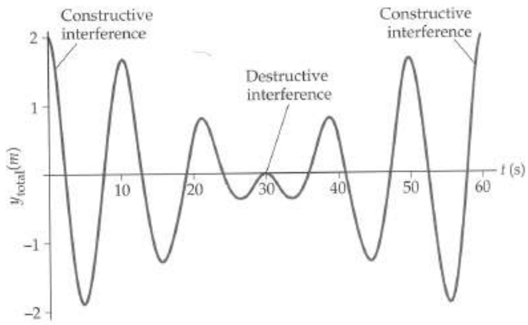


Toepassing van het superpositieprincipe geeft:

$$y = y_1(t) + y_2(t) = A(\sin\omega_1 t + \sin\omega_2 t)$$

Rekening houdend met de regel voor de som van sinussen geeft dit

$$y = \left[2A\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)t\right]\sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right)t$$



Het verloop van die samengestelde golf is hieronder weergegeven. We krijgen een golf met een frequentie die het gemiddelde is van de frequentie van beide golven (dus nagenoeg dezelfde toon) doch met een **periodiek variërende amplitude**. De frequentie van deze variatie wordt gegeven door $|f_1 - f_2|$. Dit wordt de frequentie van de zweving genoemd.

Telkens wanneer

$$2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t \quad \text{gelijk is aan} \quad \left(\frac{2n+1}{2}\right)\pi \quad \text{met n=0,1,2…..}$$

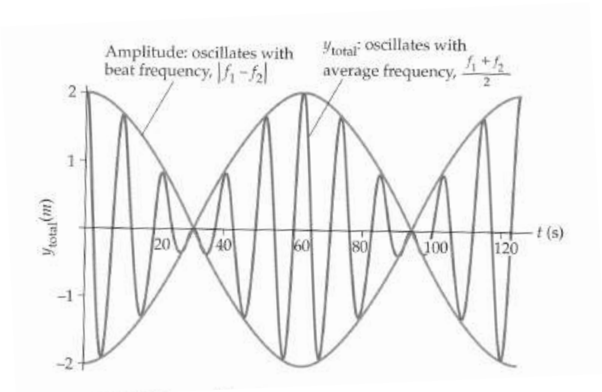
of

$$\left(f_1 - f_2\right)t = \frac{2n+1}{2} \quad \text{is de amplitude 0}$$

Het **tijdsinterval t tussen twee minima** is dus $t = \dfrac{1}{f_1 - f_2}$

Het **aantal zwevingen per seconde** is dus het verschil tussen de frequenties van de twee golven $f_1 - f_2$

Is het aantal zwevingen kleiner dan of gelijk aan zeven per seconde dan zijn de periodieke amplitudeveranderingen zeer goed hoorbaar.



3.4. Het doppler effect

Indien een waarnemer en een geluidsbron relatief ten opzichte van elkaar bewegen dan zal de waargenomen frequentie niet dezelfde zijn als de uitgezonden frequentie. Bewegen beiden naar elkaar toe dan is de waargenomen frequentie groter dan de uitgezonden. Het omgekeerde doet zich voor als de waarnemer en de bron zich van elkaar verwijderen. Dit effect heet het **Doppler effect**. Dit effect treedt op voor alle golffenomenen (microgolven, radiogolven, zichtbaar licht,..) en dus niet alleen voor mechanische golven!

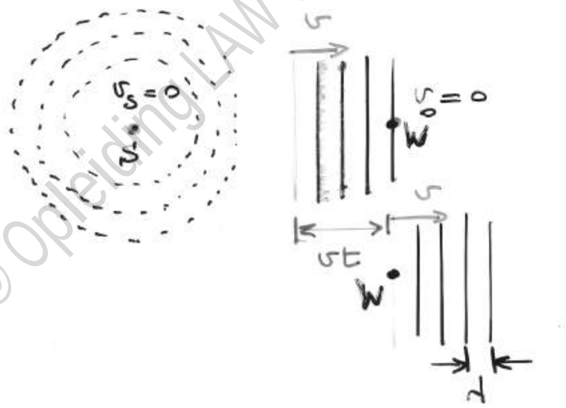
Hieronder bespreken we alleen het Doppler effect **voor geluidsgolven**.

Als referentie wordt het medium genomen waarin de golf zich beweegt bvb. lucht. Dit houdt in dat de snelheid van de geluidsbron en de waarnemer relatief is t.o.v. de snelheid van lucht. De bron en de waarnemer bewegen langs de verbindingslijn tussen beiden en hun snelheden zijn kleiner dan de geluidssnelheid (ongeveer 340 m/s in lucht).

3.4.1. De waarnemer en de bron in rust

Een stilstaande bron (v_S=0) zendt met een snelheid v sferische golffronten uit naar een waarnemer in rust (v_O=0). In een tijdsinterval t zullen de golffronten een afgelegde weg = vt hebben.

Het aantal golflengten in die afstand vt is $\frac{vt}{\lambda}$. Dit is ook het aantal golffronten dat de waarnemer opvangt in de tijd t.



De snelheid waarmee de waarnemer die golffronten opvangt d.w.z. het aantal trillingen per tijdseenheid of de frequentie , is dan gelijk aan:

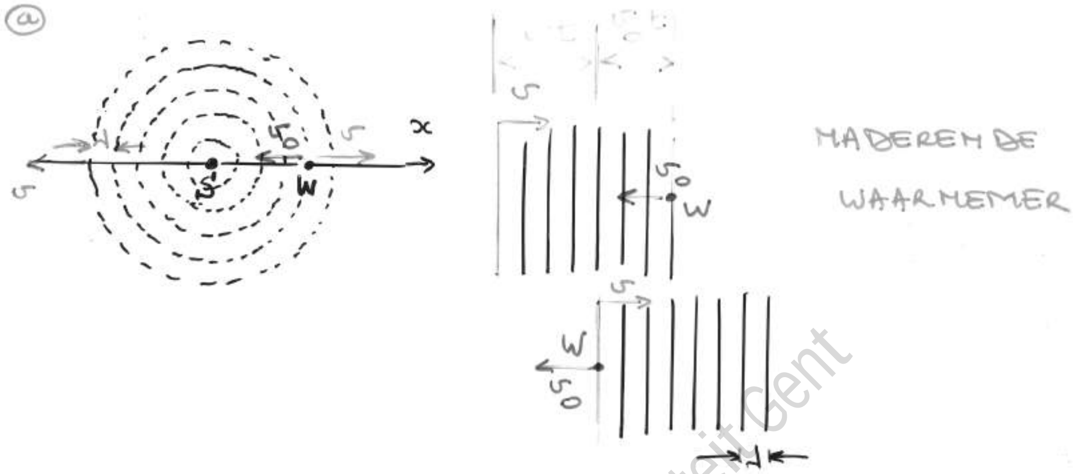
$$f = \frac{\frac{vt}{\lambda}}{t} = \frac{v}{\lambda}$$

De waarnemer ontvangt dezelfde frequentie als de uitgezonden frequentie.

3.4.2. De waarnemer in beweging en de bron in rust ($v_S = 0$)

Bij een naderende waarnemer

De waarnemer beweegt met een snelheid v_O t.o.v. de bron en het medium. In de figuur stellen de cirkels de golffronten voor op een onderlinge afstand gelijk aan de golflengte λ.



In een tijd t beweegt de golf over een afstand vt naar rechts terwijl de waarnemer de bron nadert over een afstand v_O t.
In die tijd is dus de afgelegde afstand door de golffronten relatief t.o.v. de waarnemer gelijk aan:

$$vt + v_O t$$

zodat het aantal golflengten in deze relatieve afstand $\frac{vt+v_O t}{\lambda}$ is.

De snelheid waarmee de waarnemer dit aantal golflengten opvangt of de frequentie door de waarnemer waargenomen bedraagt:

$$f' = \frac{(vt + v_0 t)/\lambda}{t} = \frac{v+v_O}{\lambda}$$

$$f' = f\,\frac{v+v_O}{v}$$

Dus indien de waarnemer een stilstaande bron nadert, vangt hij een hogere frequentie op dan de uitgezonden frequentie.

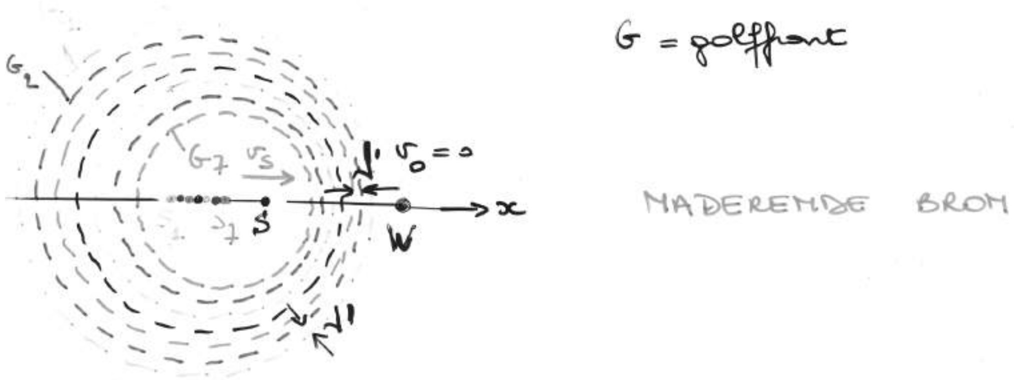
Bij een zich verwijderende waarnemer

Analoog kan men aantonen dat de ontvangen frequentie f' nu kleiner is dan de uitgezonden frequentie.

$$f' = f\,\frac{v - v_O}{v}$$

3.4.3. De bron in beweging en de waarnemer in rust ($v_O = 0$)

Bij een naderende bron



De periode $T = \frac{1}{f}$ is de tijd tussen het uitzenden van 2 opeenvolgende golffronten.

Gedurende deze tijd T beweegt het eerste golffront G1 zich over een afstand vT en beweegt de bron over een afstand $v_S T$. Op het einde van deze tijd T wordt het tweede golffront G2 uitgezonden.
In de richting van de beweging van de bron is de afstand tussen de golffronten G1 en G2 gelijk aan:

$$vT - v_S T = \lambda'$$

De frequentie die de waarnemer opvangt wordt nu:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{vT - v_S T}$$

$$f' = f\frac{v}{v - v_S}$$

Deze frequentie is groter dan de uitgezonden frequentie!

Bij een zich verwijderende bron

Analoog kan men aantonen dat de waargenomen frequentie afneemt indien de bron zich verwijdert met een snelheid v_S :

$$f' = f\frac{v}{v + v_S}$$

Door het Doppler effect is er een hogere waargenomen toonhoogte van een sirene wanneer een wagen met sirene nadert om daarna te dalen wanneer de wagen langs de andere zijde zich verwijdert.

3.4.4. Algemene Doppler effect formule

De voorgaande formules kan men combineren tot een algemene formule waarbij zowel de waarnemer als de bron bewegen t.o.v. het medium lucht.

$$f' = f\,\frac{v \pm v_0}{v \mp v_S}$$

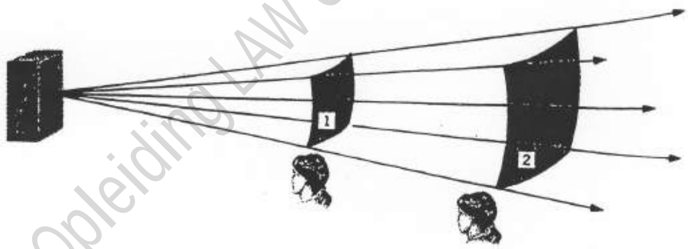
De plus- en mintekens zijn bepaald zoals in de bovenstaande vergelijkingen: *naderend* betekent *groter*!

3.5. Geluidsintensiteit

3.5.1. De inverse kwadratische wet

Indien golven vanuit een puntbron zich ongehinderd **in de ruimte** kunnen voortplanten dan zullen de golffronten sferen zijn met toenemende straal zodat de energie, die meegedragen wordt door de golf, verspreid is over een boloppervlak.
De oppervlakte van een bol met straal r wordt gegeven door:

$$A = 4\pi r^2 .$$



Dit betekent dat indien de straal van de sfeer verdubbelt, het oppervlak verviervoudigt. Dezelfde hoeveelheid energie wordt nu verspreid over een oppervlak dat verviervoudigd is, zodat de intensiteit (vermogen per eenheid van oppervlak (zie verder)) nu gedaald is tot een vierde van de originele intensiteit.
Mathematisch wordt dit uitgedrukt door:

$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

De intensiteit neemt af met het kwadraat van de afstand tot de bron – dit is de inverse kwadratische wet.

3.5.2. Verband tussen geluidsintensiteit I en geluidsdruk P_m

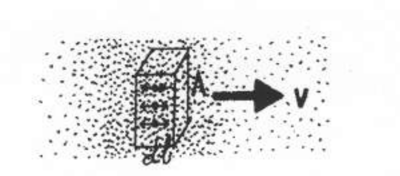
Geluidsvolume is een gewaarwording in het bewustzijn van de mens die verband houdt met een fysische grootheid, nl. de intensiteit van een golf.
De sterkte van de geluidsgolf (luidheid), **de geluidsintensiteit I,** wordt gedefinieerd als de **gemiddelde energie die met de golf meegevoerd wordt en die per tijdseenheid passeert door een eenheidsoppervlak** dat loodrecht op de voortplantingsrichting staat. De **eenheid** van geluidsintensiteit is de **Watt per m² (W/m²).**

De **hoeveelheid energie** die door de golf wordt getransporteerd is de **energie geassocieerd met de snelheid** waarmee de **moleculen van het medium om hun evenwichtspositie** trillen.

Gedurende een periode T verplaatst de golf zich over een afstand λ. De energie vervat in één golflengte gedeeld door de periode is de getransporteerde energie per tijdseenheid. Ieder deeltje dat als drager deelneemt aan de longitudinale golfbeweging bezit dezelfde energie. Ze voeren immers allen een harmonische beweging uit waarbij de energie gegeven wordt door $m_p v_{max}^2/2$ met m_p de massa van het deeltje en v_{max} de snelheid van het deeltje bij doorgang door het evenwichtspunt. In dit punt is immers de mechanische energie volledig kinetische energie (zie hoofdstuk arbeid en energie, toepassing: de veer).

Beschouw een balkvormig ***massa element dm van het medium*** met oppervlakte A loodrecht op de bewegingsrichting van de golf en dikte dl

$$dm = \rho A dl$$



dat deelneemt aan de golfbeweging.

De energie van *dit elementje* zal zijn:

$$dE = \frac{1}{2} dm \mathrm{v}_{\max}^2$$

De energie E vervat *in één golflengte* zal dan worden:

$$E = \frac{1}{2} \rho A \lambda \mathrm{v}_{\max}^2$$

Dit is de energie die voorbij komt door de doorsnede A op een bepaalde plaats gedurende een tijdsinterval T.

De energie per tijdseenheid en per eenheidsoppervlak of de geluidsintensiteit I wordt dus gegeven door:

$$I = \frac{1}{2} \rho \frac{\lambda}{T} \mathrm{v}_{\max}^2$$

of

$$I = \frac{1}{2} \rho \mathrm{v} \mathrm{v}_{\max}^2$$

met v de snelheid van de golf

De maximale snelheid van de moleculen bij hun oscillatie $\mathbf{v_{max}}$ is **evenredig** met de amplitude van de drukgolf $\mathbf{P_m}$. De evenredigheidsfactor wordt de **akoestische impedantie Z** van het medium genoemd .
Per definitie krijgen we :

$$Z = \frac{P_m}{\mathrm{v}_{\max}}$$

→ Bij **grote waarde van Z** gaat de **drukgolf resulteren in een kleine intensiteit**. Bij **kleine waarde van Z** zal de **drukgolf resulteren in een grote intensiteit**.

Substitutie van v_{max} in I geeft aldus:

$$I = \frac{1}{2}\rho \mathrm{v} \frac{P_m^2}{Z^2}$$

Er kan worden aangetoond dat **Z bepaald** wordt door ρ**, de dichtheid van het medium** en **v, de voortplantingssnelheid van geluid in het medium**:

$$Z = \rho \mathrm{v}$$

Invullen van Z levert finaal voor de **intensiteit I**

$$I = \frac{P_m^2}{2Z}$$

De **intensiteit I** is dus **evenredig met $\mathbf{P_m^2}$** . De **evenredigheidsconstante** is de **specifieke akoestische impedantie van het medium Z** op een factor 2 na.

De specifieke akoestische impedantie Z wordt uitgedrukt in de eenheid rayl (kg/m^2s). De waarde van Z voor enkele belangrijke media en weefsels is te vinden in onderstaande tabel.

Z is voor water dus 3800 maal groter dan voor lucht. Dezelfde drukgolf zal in water dus een 3800 kleinere intensiteit hebben dan in lucht.

Algemeen is de specifieke akoestische impedantie groter in vaste stoffen dan in vloeistoffen en in vloeistoffen op zijn beurt groter dan in gassen.

Het menselijk oor kan een groot bereik aan intensiteiten verwerken: van ca. 10^{-12} W/m^2 bij 1000Hz (geluidsdrempel) tot ongeveer 1 W/m^2 (pijngrens).
Dit is een zeer groot intensiteitbereik. Echter wat de mens als volume ervaart is niet rechtevenredig met de intensiteit. In het gebied rond de 1000 Hz klinkt een geluidsgolf met een intensiteit van $1W/m^2$ voor de gemiddelde mens tweemaal zo hard als een geluidsgolf met een intensiteit van 10^{-2} W/m^2 en viermaal zo hard als 10^{-4} W/m^2.

De amplitude van de drukgolf corresponderend met de geluidsdrempel van 10^{-12} W/m^2 in lucht bedraagt dus slechts $3 \cdot 10^{-5}$ Pa. Die corresponderend met de pijngrens 30 Pa. Dit zijn zeer kleine drukken vergeleken met de atmosfeerdruk ($1 \cdot 10^5$ Pa).

3.5.3. Relatieve geluidsintensiteit: de decibel

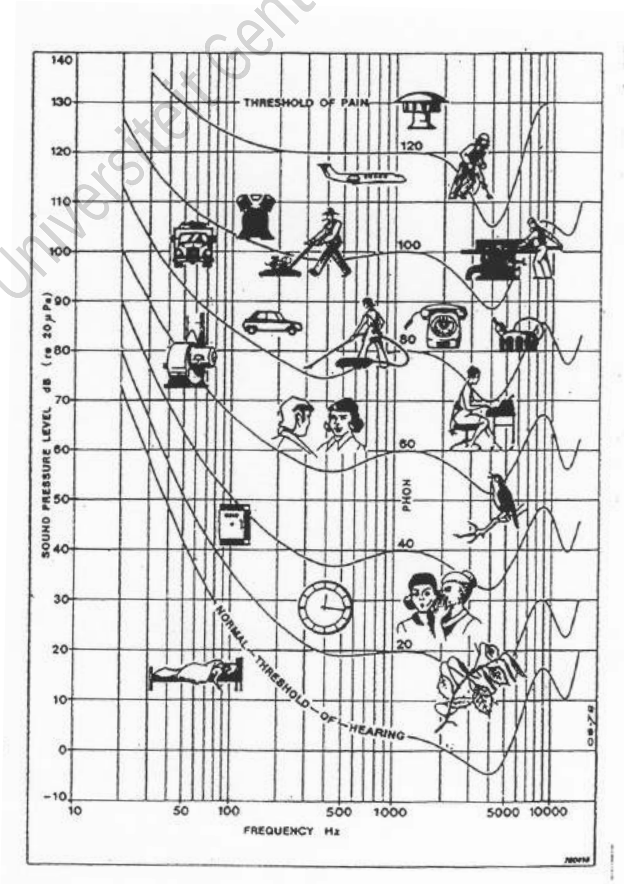
In de praktijk wordt echter meestal niet I, de ***absolute*** intensiteit, gebruikt doch wel **de relatieve intensiteit L_p (ook geluidsniveau of geluidssterkte** genoemd) met als **eenheid de decibel (dB).** Deze wordt verkregen door een geluid met intensiteit I te vergelijken met een standaardintensiteit I_0, die correspondeert met een gemiddelde geluidsdruk van 20 µPa. Deze druk komt overeen met de geluidsdrempel van de “gemiddelde “ mens in het frequentiegebied rond 2000 Hz.

Het geluidsniveau L_p in de eenheid decibel wordt gedefinieerd als:

$$L_p = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{uitgedrukt in dBSPL}$$

Deze definitie is gebaseerd op de observatie dat de subjectieve sensatie (volume) van de geluidsintensiteit globaal logaritmisch met grondtal 10 verloopt m.a.w. wanneer de geluidsintensiteit toeneemt met een factor 10, 100, 1000, 10000,…. wordt ervaren als een lineaire toename van de luidheid volgens 1,2,3,4, …

Als de intensiteit van een geluid **10 x zo groot** is als die van een ander geluid dan verschillen die geluiden **10 dB**, verschillen ze een **factor 100** in absolute intensiteit dan verschillen ze **20 dB.** Hieronder zijn richtwaarden van het geluidsniveau in dB van enkele geluiden weergegeven in een tabel.



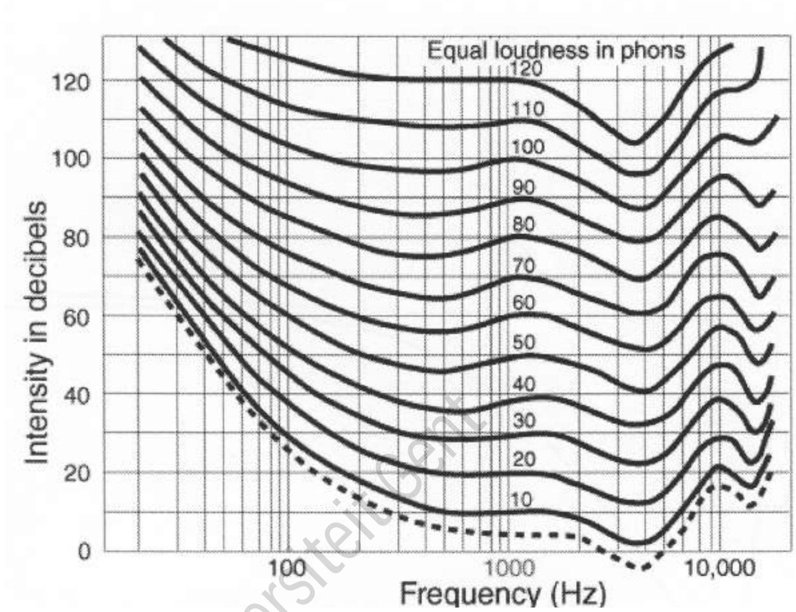
Tabel: L_p in dB van enkele geluiden

	L_p (dB)
Geluidsdrempel	0
Fluisteren	20
Praten (op1 m)	65
Verkeer (in wagen)	80
Rock concert	120

3.5.4. Isofonen

Hoe luid een geluid subjectief ervaren wordt, hangt niet alleen af van het geluidsniveau in dB's maar eveneens van de frequentie van het geluid gezien het oor niet voor alle frequenties even gevoelig is. De **geluidssterkte uitgedrukt in foon** houdt **rekening met** de **frequentieafhankelijkheid van de gevoeligheid van het oor.**

De geluidssterkte van een toon uitgedrukt in foon met een bepaalde frequentie is gelijk aan het geluidsniveau van een even luide toon (uitgedrukt in dB) met een frequentie van 1 kHz. De informatie noodzakelijk hiervoor is terug te vinden in een fonenveld met **isofonen**, lijnen die **intensiteitswaarden** in dB verbinden die even luid ervaren worden als die bij **1 kHz** (figuur hieronder).



Het frequentieverloop van de **gehoordrempel** is de **isofoon van 4 foon**. Zo correspondeert een geluidsniveau van 70 dB bij 20 Hz met 4 dB bij 1 kHz : 4 foon of de geluidsdrempel. De **isofoon** van **130 foon** geeft het frequentieverloop van de **pijngrens**.
Aan het verloop van de isofonen ziet men dat vooral voor zwakke geluiden de gevoeligheid van het oor sterk afneemt bij frequenties beneden 500 Hz en boven 5 kHz. Verder blijkt ook dat de frequentieafhankelijkheid van de luidheidsbeleving afneemt bij toenemende intensiteit.

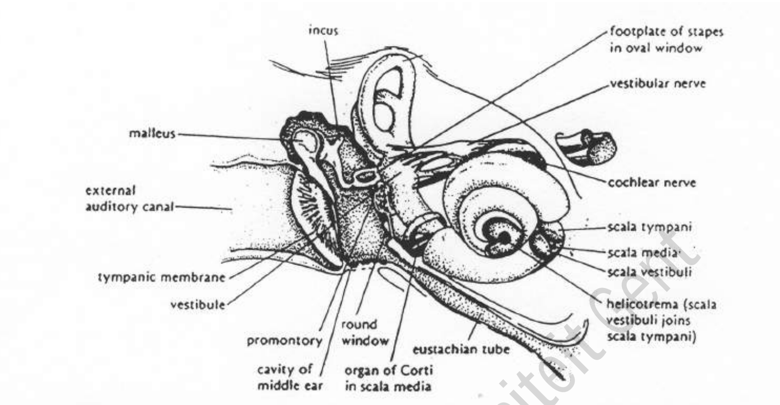
De gevoeligheid van het oor of intensiteits-onderscheidingsdrempel is de kleinste verandering in luidheid die nog kan worden waargenomen. Ze bedraagt voor een normaal oor 0,5 dB bij 2 kHz. Dit correspondeert met een intensiteitsverhouding

$$\frac{I_1}{I_2} = 1{,}12$$

3.6. Akoestische eigenschappen van het oor

Het oor is een **transducer** die de **mechanische energie** van de inkomende geluidsgolf omzet in **elektrische energie**.
Het **buitenoor** fungeert als **collector en geleider** van de geluidsgolven naar het trommelvlies.
Het **middenoor** amplifieert de inkomende geluidsdruk en zorgt voor de **impedantieovergang** tussen binnen- en buitenoor.
In het **binnenoor** wordt de mechanische energie omgezet in electrische signalen.

Een schematisch overzicht van de anatomie van het gehoororgaan is hieronder weergegeven.

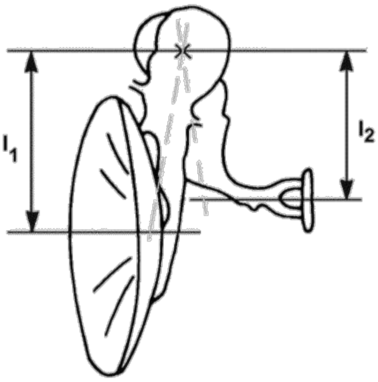


Het **gehoorkanaal** tot het trommelvlies van het buitenoor kan beschouwd worden als een **resonator** met lengte ongeveer 30 mm en diameter 6 mm, aan één zijde geopend. Dergelijke buis laat staande golven toe met frequentie

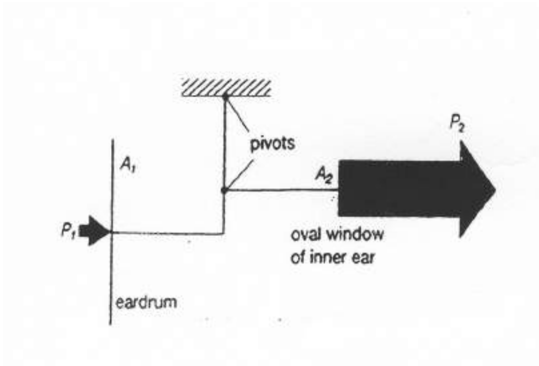
$$f_n = (2n+1)\frac{\mathrm{v}}{4l}$$

waarbij v de geluidssnelheid is en l de lengte van de buis. Dit geeft voor het buitenoor bij een geluidsnelheid van 340 m/s een **basisfrequentie van 2,8 kHz**. Het oor is inderdaad **het meest gevoelig** voor geluid rond deze frequentie.

In het middenoor vindt een **amplificatie van de druk** van het trommelvlies naar de druk op het membraan bij het ovaal venster plaats via de gehoorbeentjes (malleus, incus, stapes). Deze gehoorbeentjes fungeren als een **hefboomsysteem**. Doordat de hefboomarm van de hamer (malleus) groter is dan van de stijgbeugel (stapes) is de kracht die deze laatste uitoefent op het ovale venster vergroot met een factor 1,3 t.o.v. van de kracht van het trommelvlies op de hamer.



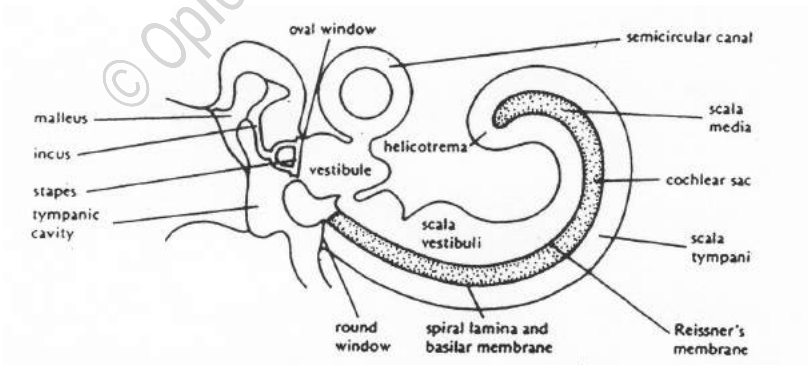
Daarnaast gaat de druk ter hoogte van het ovale venster eveneens verhoogd worden vergeleken met het trommelvlies doordat zijn **oppervlakte** drastisch kleiner is: 3 mm^2 vergeleken met 60 mm^2. Beide effecten resulteren in een factor 25 voor de drukverhouding ovaal venster-trommelvlies.



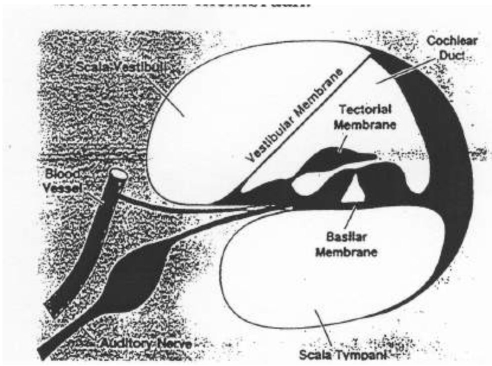
Zonder drukamplificatie in het middenoor zouden bij de overgang lucht buitenoor-perilymfe binnenoor de geluidsgolven nagenoeg compleet gereflecteerd worden. Doordat de akoestische impedantie in de vloeistof ongeveer 3600 keer groter is dan in lucht zou de geluidsintensiteit in het binnenoor met deze factor worden gereduceerd. Door de drukamplificatie met een factor 25 in het middenoor wordt deze reductie teruggebracht tot 625/3600 of ongeveer een factor 5.

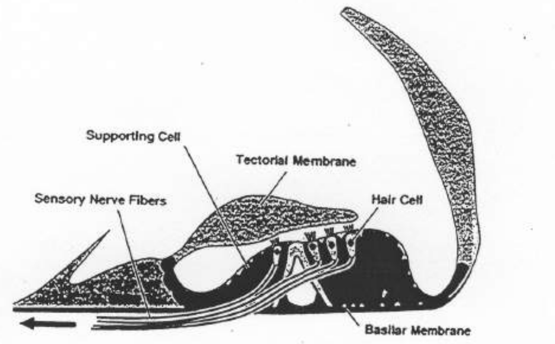
Het middenoor is zo in staat een **goede mechanische energieoverdracht van buiten- naar binnenoor** te realiseren in een **frequentiegebied van 400 Hz tot ongeveer 4000 Hz**. Beneden 400 Hz is het gehoorbeentjesssysteem te stijf en boven 4 kHz is de massa ervan te groot. Dit vinden we dan ook terug in de frequentieafhankelijkheid van de gevoeligheid van het oor.

Via het **ovaal venster** gaat de geluidsgolf binnen in het binnenoor en de **cochlea**. De cochlea of het slakkenhuis is een schroefvormige buis die bestaat uit drie gescheiden kamers (scala vestibuli, scala media en scala tympani). De ontrolde cochlea is schematisch hieronder voorgesteld.

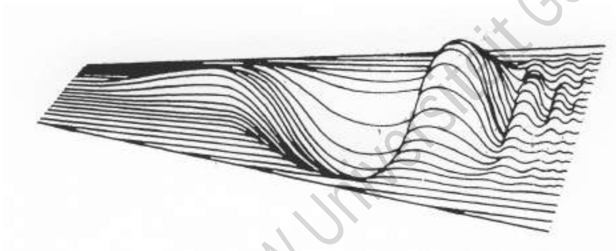


De drukgolf plant zich voort in de perilymfe via de scala vestibuli over het helicotrema naar de scala tympani. Tussen de scala tympani en de scala vestibuli, die behoren tot de benige cochlea, ligt de scala media of ductus cochlearis. De lamina basilaris (basaal membraan) van de ductus cochlearis draagt het **orgaan van Corti**, dat aan de bovenzijde begrensd wordt door het tectoriaal membraan. Het orgaan van Corti bevat haarcellen (receptorcellen) die in contact liggen met zenuwvezels. De stereociliën van de haarcellen kunnen afgebogen worden tegen het tectoriaal membraan.

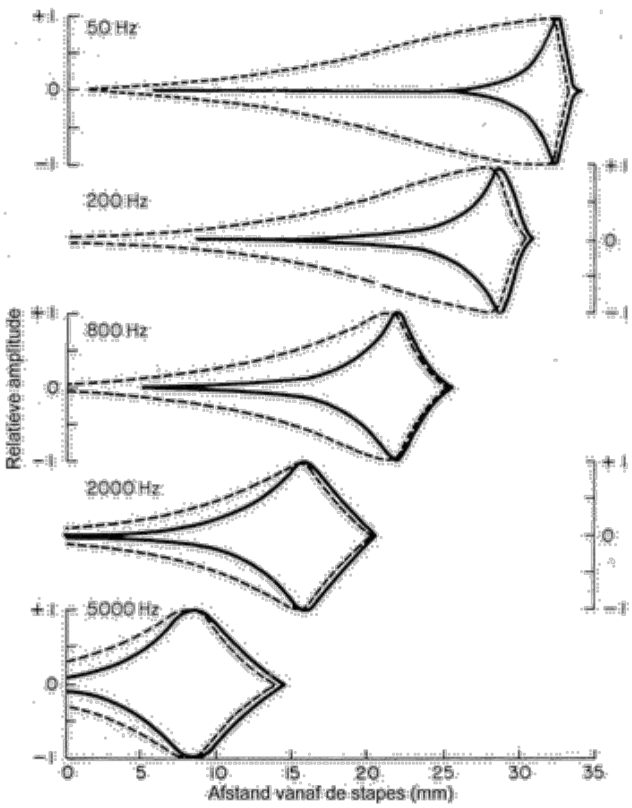




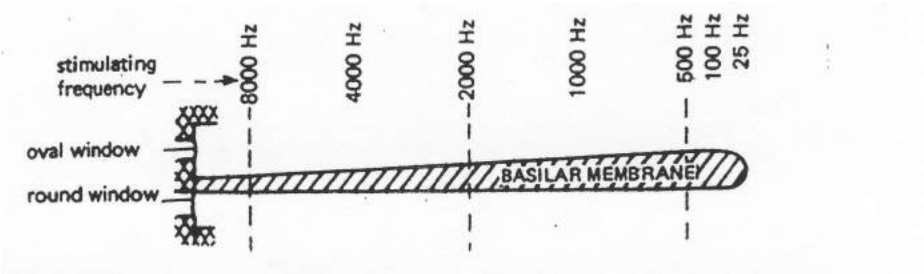
De drukgolf wordt op het einde van de scala tympani gereflecteerd door het **ronde venster**. De gereflecteerde lopende drukgolf wordt opgevangen door een vervorming van het basaal membraan zoals weergegeven in onderstaande figuur. Door de verplaatsing van dit membraan worden de stereociliën van de haarcellen van het orgaan van Corti afgebogen langs het tectoriaal membraan met als gevolg dat de elektrische potentiaal daar lokaal verandert en een actiepotentiaal (zie verder deel elektriciteit) wordt gegenereerd in de haarcellen die in contact staan met de zenuwvezels die het signaal verder doorsturen naar de hersenen.



De **frequentiegevoeligheid** van het gehoor wordt bepaald door de **plaats van de drukgolf** op het **basaal membraan**. Deze drukgolf gaat dus van het ronde venster naar de apex van de cochlea. In bijhorende figuur geeft de omhullende de amplitude van de druk als functie van plaats op het basaal membraan, waarbij de cochlea is ontrold voor drie frequenties.
Voor lage tonen als 60 Hz treedt het amplitude maximum op naar de apex toe van de cochlea. Voor hoge tonen als 2000 Hz treedt het maximum op nabij het ronde venster. Voor tonen als 300 Hz treedt het maximum ergens middenin op.



Deze verschillen zijn vooral te wijten aan het feit dat het basaal membraan in dikte toeneemt naat de apex toe en dat de stijfheid ervan afneemt naar de apex toe. Dikkere en meer flexibele membranen hebben immers een lagere resonantiefrequentie. De **plaatsdistributie** van de **signalen** laat **frequentie (toon)bepaling** van de invallende geluidsgolf toe.



De **frequentie-onderscheidingsdrempel** bedraagt typisch 0,003 d.w.z. dat 1003 Hz en 1000 Hz nog juist kunnen gescheiden worden.