

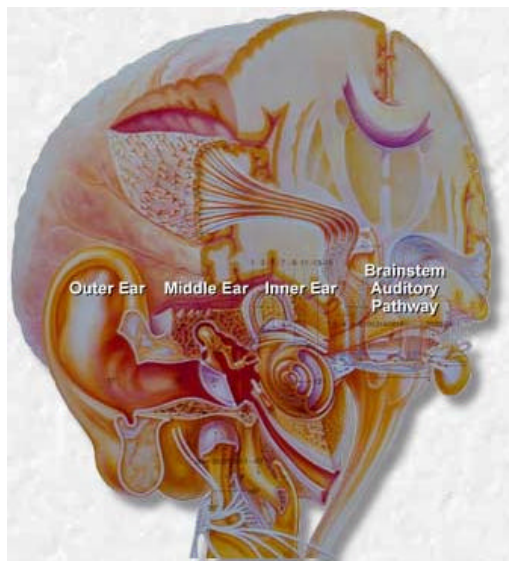
1 Ervaren van geluid

Bij de studie van omgevingslawaai is het nuttig een beeld te hebben van hoe geluid door de mens wordt ervaren. Verschillende aspecten van deze problematiek zijn:

- *Wat kunnen we horen?* Met andere woorden voor welke geluiden is ons gehoor gevoelig. Kennis over wat we kunnen horen zal bij het bouwen van meetapparatuur gebruikt worden, om er voor te zorgen dat wat we meten zo nauw mogelijk aansluit bij wat we horen.
- *Hoe kan een te veel aan geluid het functioneren van het oor tijdelijk of permanent beïnvloeden?* De geluidsniveaus die permanente gehoorbeschadiging tot gevolg hebben komen zelden in leefomgevingen voor maar worden o.a. wel op de arbeidsplaats en tijdens recreatieve activiteiten vastgesteld.
- *Welke psychologische invloed kan lange blootstelling aan geluid op een mens hebben?* Bij geluidsniveaus die voor de studie van omgevingslawaai relevant zijn, zijn belangrijke effecten: hinder, slaapverstoring, verstoring van communicatie, verstoring van diverse activiteiten zoals studeren.

Een basiskennis betreffende de fysiologische werking van het oor is nuttig om vastgestelde effecten te begrijpen.

1.1 Het gehoor

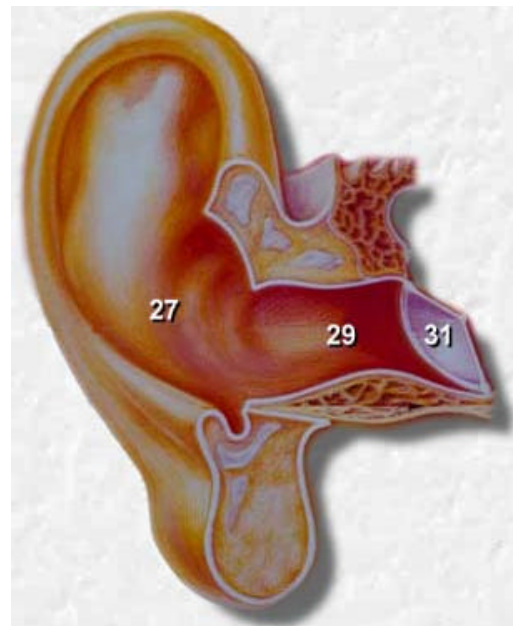


bron figuren: <http://www.odc.state.or.us/tadoc/hloss28.htm>

Het menselijk oor bestaat uit drie gebieden, zoals in de figuur links getoond wordt: [het uitwendige oor](#), [het middenoor](#) en [het binnenoor](#).

Het uitwendige oor

Het uitwendige oor, dat bestaat uit de oorschelp (27) en de gehoorgang (29), vangt de geluidsgolven op en leidt ze naar het trommelvlies. De vorm van de oorschelp heeft een invloed op het waarnemen van de richting waar het geluid vandaan komt. De gehoorgang zorgt ervoor dat het inwendige oor diep in de schedel ligt en daardoor beschermd is tegen mechanische beschadiging. De lengte van de gehoorgang resulteert in een longitudinale resonantie bij frequenties tussen 2000 en 4000 Hz. De versterking die hierdoor ontstaat is terug te vinden in de frequentieafhankelijkheid van de gevoeligheid van het menselijk oor.



Het middenoor

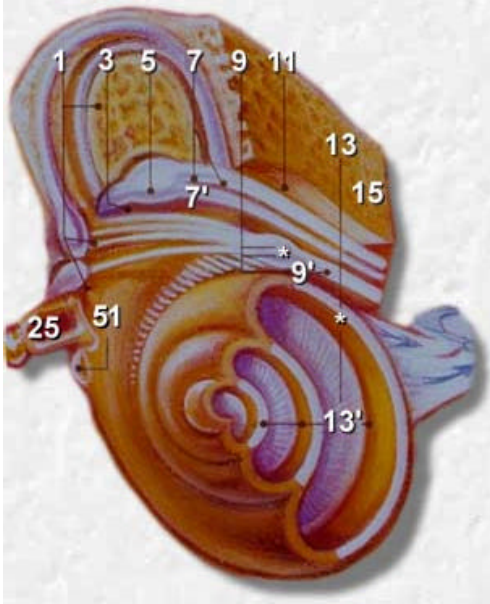
Het middenoor bestaat uit het trommelvlies (31) en een set van drie beentjes: hamer (17), aambeeld (19) en stijgbeugel (25). Het middenoor heeft twee functies:

1. De trilling van de luchtmoleculen in de gehoorgang wordt optimaal omgezet in een trilling van het ovale venster van het binnenoor. Hierbij werken de drie beentjes als hefboompjes met een mechanische versterking van de beweging van ongeveer 3:1. Bovendien is het systeem zodanig dat de geluidsgolf in de gehoorgang nauwelijks gereflecteerd wordt door het trommelvlies. Het is ook nodig dat er een zo efficiënt mogelijke omzetting gebeurt van luchtgeluid naar trilling van het ovale venster. De beweging van de luchtmoleculen, die overeenkomt met het stilste hoorbare geluid bedraagt slechts 10^{-11} m wat kleiner is dan de diameter van een watermolecule.

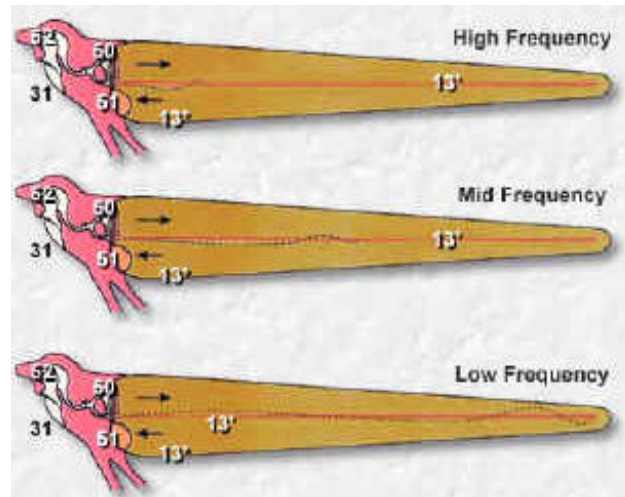


2. Het middenoor zorgt ook voor een bescherming van het gevoelige binnenoor tegen beschadiging door te luide geluiden. Dit gebeurt door kleine spiertjes, die aan de gehoorsbeentjes bevestigd zijn en deze min of meer star op hun plaats kunnen houden. De spiertjes worden gestuurd door een feedbackmechanisme en kunnen verzwakkingen tot 20 dB introduceren. Deze akoestische reflex is echter niet ogenblikkelijk. Het duurt ongeveer 10 ms vooraleer de spiertjes reageren. Plotse akoestische gebeurtenissen (knallen) kunnen het systeem dan ook verrassen zodat ze ongehinderd op het binnenoor invallen en voor permanente beschadiging kunnen zorgen. Dit is een van de redenen waarom wetgeving ter bescherming van het gehoor ook rekening zal moeten houden met impulsgeluid (knallen, kloppen, enz...). Wanneer we zelf luid spreken dan is ons oor wel voorbereid zodat er in dat geval geen kans op gehoorbeschadiging bestaat.

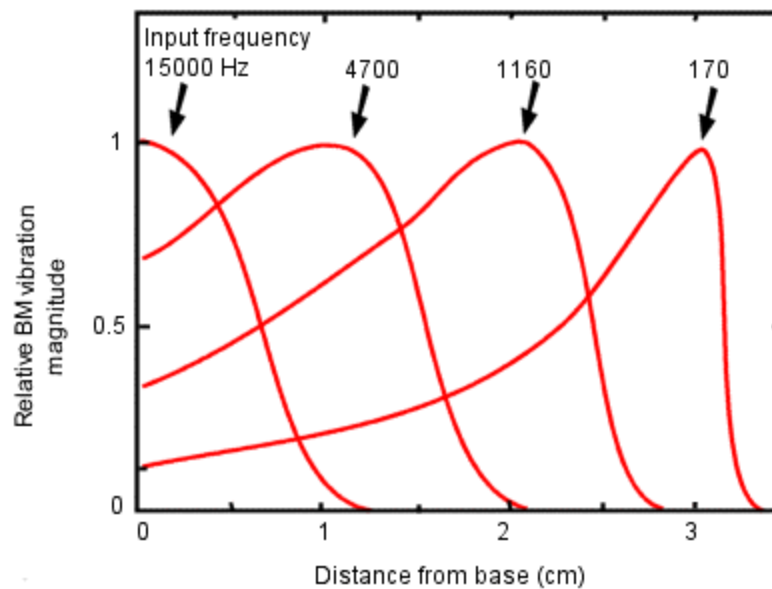
Het binnenoor



De omzetting van de akoestische trilling naar een zenuwimpuls gebeurt in het binnenoor. Het binnenoor bevat twee systemen: het semi-circulaire kanaal, dat te maken heeft met het evenwicht en het slakkenhuisje, dat verband houdt met het horen. Het slakkenhuisje (13') is een mechanisch filter dat het binnenkomende complexe geluid opdeelt in zijn frequentiecomponenten. De opbouw van het slakkenhuisje is te zien op onderstaande beelden.

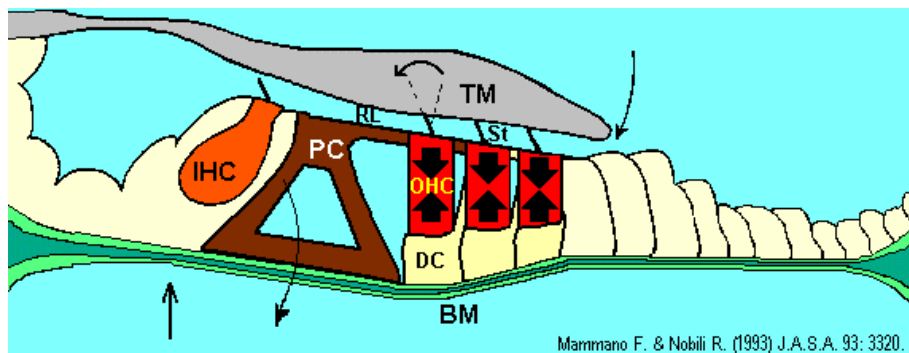


Het slakkenhuis is verdeeld in twee kanalen, van elkaar gescheiden door het 'basilar' membraan. Dit membraan vertoont enkel een kleine opening helemaal achteraan. Wanneer de stijgbeugel het ovale venster (50) aan het trillen brengt, zal een trilling in de vloeistof ontstaan. Deze zal eerst door het bovenste kanaal propageren, dan door de opening en door het onderste kanaal terugkeren naar het ronde venster (51), waarin ze ten slotte geabsorbeerd wordt. De trilling zal het membraan vervormen. Het mechanisch systeem dat gevormd wordt door de vloeistof in het bovenste kanaal (massa), het 'basilar' membraan (veer) en de vloeistof in het onderste kanaal (massa) zullen in resonantie komen bij een bepaalde frequentie. Vermits de stijfheid van het membraan verandert met de plaats en vermits de hoeveelheid vloeistof die een rol speelt eveneens toeneemt naarmate we dieper in het slakkenhuis doordringen, zal de resonantiefrequentie afhangen van de plaats in het slakkenhuisje. Onderstaande figuur geeft de sterkte van de trilling van het 'basilar' membraan in functie van de afstand gemeten langsheen het slakkenhuisje voor verschillende frequenties. Lage frequenties laten vooral het uiteinde van het membraan trillen, hoge frequenties geven vooral trillingen bij het begin van het membraan (dicht bij het ovale venster).



De frequenties worden dus mechanisch van elkaar gescheiden.

Wanneer het membraan meer in detail wordt bestudeerd (zie onderstaande schets), dan valt de complexe structuur op. Het zogenaamde orgaan van Corti omvat naast het 'basilar' membraan ook het 'tectorial' membraan en meer dan 10.000 haarcelletjes. Men onderscheidt binnenste (IHC) en buitenste (OHC) haarcelletjes. De binnenste haarcelletjes reageren op een beweging door het afvuren van zenuwpulsen (ongeveer 100 pulsen/s), die via de gehoorzenuw in de hersenen terechtkomen. Het patroon van zenuwpulsen wordt mee bepaald door de sterkte van de trilling. De hersenen genereren het akoestisch beeld op basis van deze informatie en de plaats van herkomst van de zenuw in het slakkenhuisje.



Het centraal zenuwstelsel kan de werking van het oor echter beïnvloeden. Dit gebeurt via de buitenste haarcellen (OHC) die als een soort motor de trilling van het 'basilar' membraan (BM) versterkt doorgeven aan het 'tectorial' membraan (TM). De mate van versterking die bekomen wordt, hangt af van de scheikundige omgeving van de buitenste haarcellen. Dit complexe systeem laat toe dat we ons gehoor focuseren op bepaalde geluiden in een eerder luidruchtige omgeving.

Wanneer gehoorbeschadiging optreedt door veroudering of blootstelling aan te hoge geluidsniveaus, dan zijn het dikwijls eerst de buitenste haarcellen die afsterven. Hierdoor wordt bijvoorbeeld het volgen van een gesprek in een luidruchtige omgeving bemoeilijkt.



1.2 Frequentieafhankelijkheid van de gevoeligheid van het oor

De gevoeligheid van het menselijk oor hangt af van de frequentie. Frequenties lager dan 20 Hz zijn onhoorbaar en worden **infrasoon** genoemd. Frequenties boven 20000 Hz zijn eveneens onhoorbaar en worden **ultrasoon** genoemd. Deze grenzen van het hoorbare geluid zijn niet abrupt. Er is een graduele afname van de gevoeligheid van ons oor naarmate de geluidsfrequentie deze limieten nadert. Bovendien is de gevoeligheid afhankelijk van persoon tot persoon. Toch is het mogelijk een gemiddelde gevoeligheid af te leiden bijvoorbeeld voor jonge mensen met een gezond gehoor.

Met luidheid wordt in deze context verwezen naar de ervaring van geluid. De luidheid in foon wordt geïntroduceerd om de fysische geluidsdruk om te zetten in een grootte, die de ervaring beter benadert. Bij het meten van geluid was deze nauwkeurige, doch eerder ingewikkeld te bepalen grootte, niet zo geschikt. Daarom werden benaderde wegingen ingevoerd.

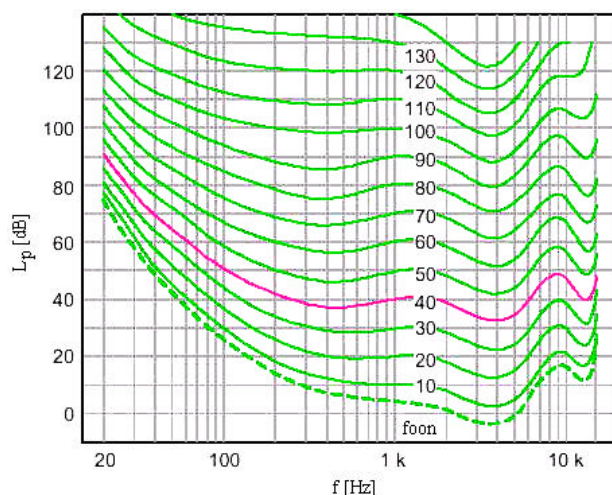
Merk op dat een mens ook een verandering van frequentie van het geluid op een welbepaalde manier ervaart. Dit is evenwel niet het onderwerp van de volgende paragrafen.

1.2.1 Foon

We onderzoeken de relatie tussen luidheid en frequentie. Fletcher en Steinberg (1924) en **Fletcher en Munson** (1933) blijken de eerste experimenten te hebben uitgevoerd om het geluidsdrukniveau te meten van zuivere tonen met verschillende frequenties die bij de mens even luid overkomen. Fletcher en Munson (1933) gebruikten een 1000 Hz zuivere toon van gekend geluidsdrukniveau als maatstaf tegenover welke de zuivere tonen met andere frequenties beoordeeld worden wat betreft luidheid.



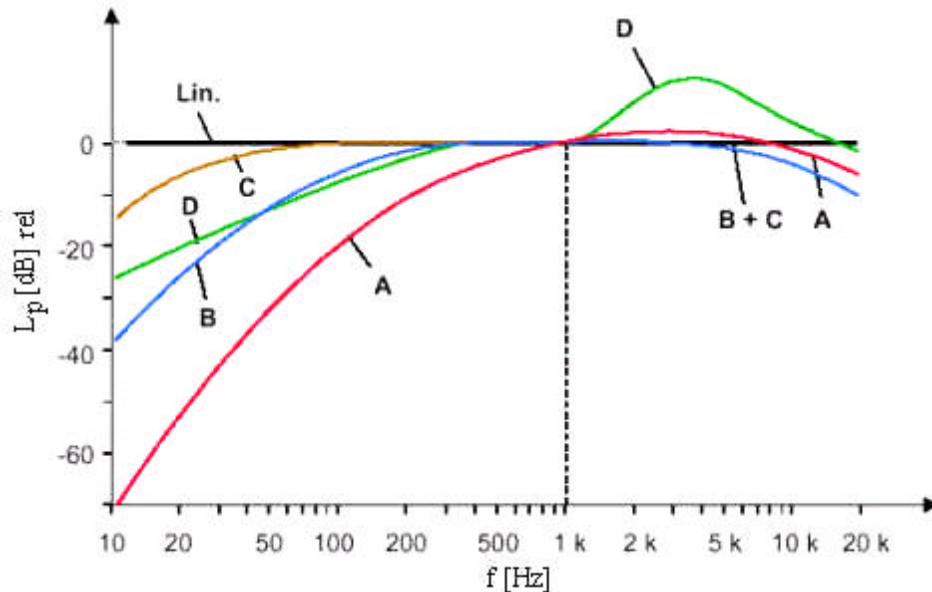
Door deze experimenten uit te voeren voor tonen van verschillende frequenties en geluidsdrukniveaus worden de curven bekomen van alle punten overeenkomstig een geluid dat de mens even luid beoordeelt als een 1000 Hz toon van een bepaald geluidsdrukniveau. Deze curven noemen we **isofonen** (norm : [ISO 226-1987](#)).



- Een isofoon wordt gekenmerkt door een **foon**-waarde, die overeenkomt met het geluidsdrukniveau bij 1000 Hz. Voor een 1000 Hz toon met een geluidsdrukniveau van b.v. 40 dB spreken we van een isofoon van 40 foon.
- De foon is de eenheid voor het **luidheidniveau**.
- De isofoon van 0 foon is de **hoorbaarheidsgrens**, de **pijngrens** ligt in de omgeving van de isofoon van 120 foon.

1.2.2 A-weging

Op basis van de resultaten van Fletcher en Munson worden elektronische filters gebouwd, die in een geluidsdrukniveaumeter kunnen geïntegreerd worden. Hiermee wordt de meetwaarde van de objectieve meting aangepast om de subjectieve indruk van de mens weer te geven (norm : [IEC 60651 \(1979-01\)](#)).



Volgens stijgend luidheidniveau worden **A-, B-, C-filters** gedefinieerd:

- het **A-filter** benadert de isofoon van 40 foon,
- het **B-filter** de isofoon van 70 foon
- het **C-filter** de isofoon van 100 foon.
- het **D-filter** is gedefinieerd voor toepassing op vliegtuiglawaai, waar hoge frequenties meer geluidhinder veroorzaken.

Een geluidsdrukniveau gemeten met een A-filter wordt uitgedrukt in dB(A) en toegepast voor algemeen gebruik (industrie, bouw, verkeer, ...). B- en D-filters worden bijna niet meer gebruikt. Het C-filter wordt nog regelmatig vernoemd : installatielawaai, piek-lawaai op de arbeidsplaats.

1.3 Maskeren

Heel zelden worden we omringd door slechts één geluid. Het geluid waarin we geïnteresseerd zijn, komt meestal samen voor met andere geluiden, die samen het **achtergrondlawaai** vormen. Door de aanwezigheid van het 'andere' geluid zullen we het geluid waarin we geïnteresseerd zijn, minder goed waarnemen. Dit effect noemt men **maskeren**. Men zegt dat het ene geluid het andere maskeert. Merk op dat maskeren zowel een negatieve als een positieve connotatie heeft. Wanneer een gesprek volledig gemaskeerd wordt door het geraas van voorbijrijdende auto's, dan is dit uiteraard ongunstig. Maskeert het geluid van de wind in de bladeren van de bomen echter het lawaai afkomstig van een nabijgelegen industrieterrein, dan zal dit als aangenaam ervaren worden. Door het maskeren wordt ook de ervaren luidheid van combinaties van zuivere tonen beïnvloed.

Fysiologische achtergrond

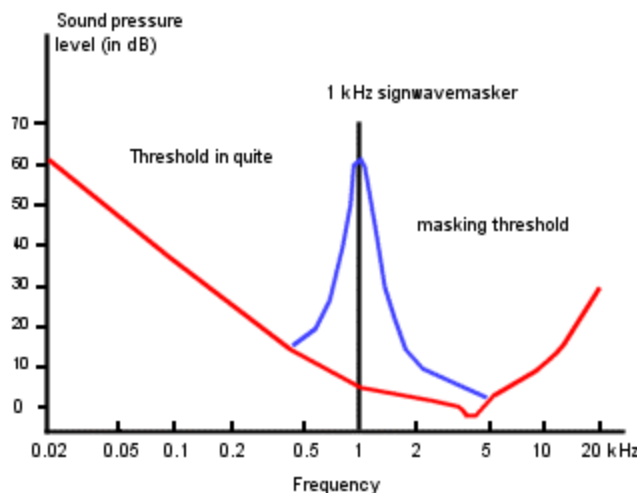
De fysiologische reden waarom maskeren optreedt, heeft te maken met de manier waarop verschillende frequenties onderscheiden worden in het slakkenhuisje van ons oor. De trilling van het 'basilar' membraan onder invloed van een zuivere toon is uitgespreid over een bepaald stuk van dit membraan. Een zwakker geluid met een nabijgelegen frequentie zal het membraan ook enigszins doen trillen, maar deze trilling wordt niet onderscheiden door de hersenen wegens de reeds aanwezige sterke trilling.

Vaststellingen in verband met maskeren

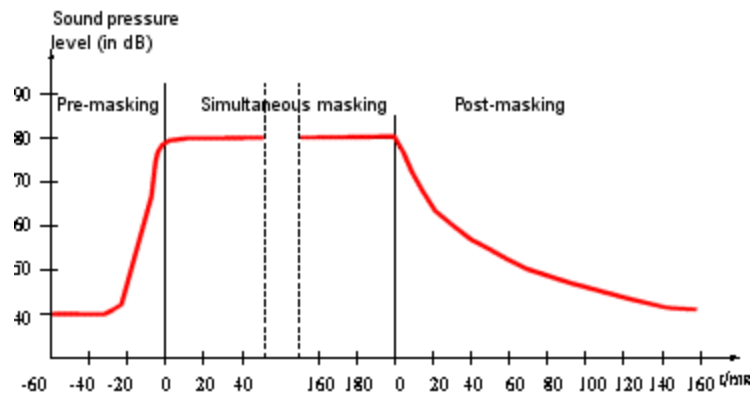
Geluid in een smalle frequentieband heeft een sterker maskerend karakter dan een zuivere toon bij dezelfde centrale frequentie, met dezelfde intensiteit.

Bij lage niveaus is het maskeren beperkt tot een smalle frequentieband rond de centrale frequentie van het maskerend achtergrondlawaai. Bij toenemende intensiteit van het maskerend lawaai, neemt de breedte van de frequentieband, waarin gemaskeerd wordt, toe.

Het effect is niet symmetrisch t.o.v. de centrale frequentie van het maskerend geluid. Hogere frequenties worden gemakkelijker gemaskeerd dan frequenties onder de centrale frequentie van het maskerend geluid.



- Maskeren is belangrijker bij mono-auraal horen dan bij binauraal horen.
- Maskeren is niet beperkt tot het tijdsinterval waarbinnen het maskerend geluid aanwezig is. Nadat dit geluid uitgeschakeld is, neemt het maskeereffect slechts geleidelijk af. Zelfs voor het maskerend geluid aangeschakeld wordt, is er een korte periode waarin gemaskeerd wordt. Dit laatste lijkt op het eerste zicht verwonderlijk. Het is echter mogelijk doordat het oor en de hersenen een zekere tijd nodig hebben om een geluid vast te stellen.



Enkele toepassingen

- Maskeren moet in rekening gebracht worden om de globale luidheidsservaring van een complex geluid te bepalen.
- Door een betekenisloos geluid (ruis, achtergrondmuziek) te genereren kan men verhinderen dat een geluid met hoge informatieinhoud (het gesprek in een aanpalend bureau, de muziek van een buur, ...) aanleiding geeft tot hinder of ergernis.
- Bij codering van muziek of spraak voor het doorsturen over een traag communicatiekanaal (internet) kan men gebruik maken van het feit dat gemaskeerde delen van de muziek toch niet gehoord worden en deze dus verwaarlozen bij de codering.

© INTEC, Universiteit Gent

1.4 Luidheid van geluiden met algemeen spectrum

De beschrijving van de luidheid van breedbandgeluid is ingewikkelder dan de beschrijving van de luidheid van zuivere tonen. Drie methodes worden hierna weergegeven :

1. Methode van Beranek
2. Methode van Stevens
3. Methode van Zwicker

© WERK, Vrije Universiteit Brussel

1.5 Verstoring van activiteiten door geluid

1.5.1 Verstoring van spraakcommunicatie

Spraakcommunicatie wordt reeds lang als een belangrijke vereiste voor een samenleving erkend. Een belemmering van deze communicatie door omgevingslawaaï vermindert huiselijke activiteiten en creëert een onaangename leefomgeving. Bovendien is het voeren van een gesprek in een lawaaierige omgeving hinderlijk en vermoeiend en kan niet tegelijkertijd de aandacht gevestigd worden op ander werk. Over het algemeen wordt het verstaan van spraak beïnvloed door

- de wijze van spreken (taal, dialect, vocabularium, articulatie, vocale inspanning);
- de bekendheid van de luisteraar met de gesproken taal;
- de sterkte van de spraak, het spraakniveau;
- de afstand tussen spreker en luisteraar;
- het visuele contact tussen spreker en luisteraar;
- de akoestische omgeving (bijvoorbeeld nagalm);
- karakteristieken van het omgevingsgeluid;
- de hoormogelijkheden van de luisteraar;

Op enkele van deze punten wordt dieper ingegaan. De gesproken en geschreven taal bevat ruim overvloedige informatie. Meestal vindt men voldoende informatie in een deel van de gesproken of geschreven zin, in enkele klanken van een woord. Indien men een taal niet volledig beheerst, dan zal een gebrek aan woordenschat vaak door de context opgevangen worden. Gaat een deel van de klanken in een zin verloren in het achtergrondlawaaï, dan zal men de vreemde taal nog moeilijk verstaan. Naarmate het verstand de set van mogelijke zinnen die in een bepaalde situatie verwacht worden, kan reduceren, zal de verstaanbaarheid in een lawaaierige omgeving toenemen. Verwacht men in antwoord op een vraag bijvoorbeeld enkel ja of nee, dan zal dit antwoord in een hoog achtergrondgeluidsniveau nog steeds gemakkelijk herkend worden. Naast bovenvermelde aspecten die nauw samenhangen met het verstaan (verstand), beïnvloeden andere opgesomde effecten vooral het waarnemen (oor). De belangrijkste invloed van het storend geluid is het maskeren van het spraakgeluid. Onder maskeren verstaat men het verhinderen van een waarneming van een bepaald geluid door aanwezigheid van een ander geluid. Het maskerend effect van een stoorgeluid wordt groter naarmate het geluidsniveau hoger wordt. De verstaanbaarheid van spraak zal dus ook afnemen bij het toenemend niveau van het stoorgeluid. Figuur 1 toont de afname van het percentage zinnen dat correct wordt verstaan bij toenemend geluidsniveau van het stoorgeluid voor gesprekken die in het dagelijks leven voorkomen in woningen, ziekenhuizen, winkels, treinen en vliegtuigen. Gesprekspartners bevinden zich op een normale afstand voor de gegeven situatie.

Om de invloed van de frequentie-inhoud van het storend geluid na te gaan, onderzocht men eerst de frequentie-inhoud van gesproken zinnen. De frequentie-inhoud blijkt licht afhankelijk te zijn van de gesproken taal, doch algemeen kan men stellen dat frequenties tussen 200 Hz en 6000 Hz voorkomen. Daarnaast maskeert een geluid met bepaalde frequentie andere geluiden met hogere frequenties beter en is het frequentiegebied waarin gemaskeerd wordt breder bij hogere geluidsniveaus. Op basis van deze vaststellingen kan men een SI-weging (spraak interferentie) voorstellen voor het meten van geluid met het oog op het vaststellen van belemmering van spraak.

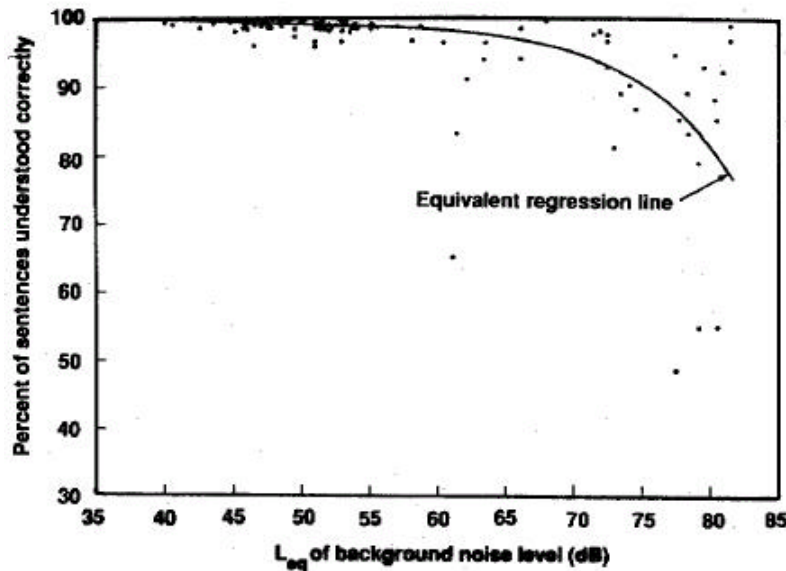


fig. 1 : Verstaanbaarheid van zinnen i.f.v. omgevingsgeluidsniveau

De akoestische omgeving kan de verstaanbaarheid van een gesprek eveneens in belangrijke mate beïnvloeden. Als spreker en waarnemer zich bijvoorbeeld in eenzelfde afgesloten ruimte bevinden, dan zal een deel van het geluid de waarnemer bereiken na één of meerdere reflecties op de wanden. Dit deel van het geluid noemt men het reverberante geluidsveld. Afhankelijk van de absorberende eigenschappen van de zaal (ruimte) zal dit reverberante geluidsveld sneller of trager afgebouwd worden. Deze eigenschap van de ruimte wordt beschreven door de reverberatie- of nagalmtijd T . Men kan gemakkelijk inzien waarom de reverberatietijd van een ruimte de verstaanbaarheid in belangrijke mate zal beïnvloeden. Onderstel dat een geluidsbron reeds een lange tijd in de ruimte aanwezig is. De opgebouwde dichtheid aan akoestische energie stellen we gelijk aan w_{tot} . Het deel hiervan dat door de bron gegenereerd werd in het laatste tijdsinterval Δt wordt gegeven door

$$w_{\text{laatste}} \Delta t = w_{\text{tot}} (1 - \exp(-\Delta t/t)),$$

waarbij de tijdsconstante τ in de exponentiële functie een maat is voor de snelheid waarmee het geluidsniveau in de zaal afneemt door absorptie en dus evenredig is met de reverberatietijd T . Als het geluid van de bron informatie draagt (spraak), dan zullen vroege echo's het geluidsniveau verhogen en dus ook de verstaanbaarheid doen toenemen. Late echo's daarentegen werken storend. Bijgevolg kan men een interval Δt vooropstellen dat het waargenomen geluid opsplijt in een nuttig geluid en een storend geluid. De verhouding van de akoestische energiedichtheid in beide categorieën wordt gegeven door:

$$\frac{w_{\text{nuttig}}}{w_{\text{storend}}} = e^{\Delta t/\tau} - 1$$

Rekening houdend met de reactietijd van het oor, die ongeveer 50ms bedraagt, kan men $\Delta t = 50\text{ms}$ kiezen. Opdat het nuttig geluid niet zou gemaskeerd worden kan men dan een maximale t berekenen. Deze correspondeert met een maximale reverberatietijd $\tau = 0.4\text{s}$. Anderzijds zal een spreker in een zaal met te lage reverberatietijd (=zeer sterk absorberende wanden) heel luid moeten spreken vermits het geluidsniveau in dat geval niet versterkt wordt door reflecties tegen de wanden.

Ten slotte moet opgemerkt worden dat de studie naar verstaanbaarheid van spraak rekening moet houden met 2 evidente parameters. Vooreerst de afstand tussen spreker en waarnemer en anderzijds de luidheid waarmee gesproken wordt : wordt er normaal gesproken, luid gesproken of geschreeuwd. De data in figuur 1 houden rekening met een te verwachten afname van de afstand spreker - luisteraar en met een normale toename van de vocale panning bij het bestudeerde achtergrondgeluidsniveau.

1.5.2 Effect op leerproces

Het leerproces en schoolactiviteiten kunnen onderbroken worden door binnendringend lawaai door :

- onderbreking van de communicatie
- afleiding door lawaai
- invloed van lawaai op het uitvoeren van taken
- hinder

Verschillende studies werden uitgevoerd naar elk van deze effecten. Daaruit bleek o.a. dat het overvliegen van vliegtuigen een belangrijke oorzaak van communicatieonderbreking is. Eens het geluidsniveau in de omgeving van een niet speciaal behandeld schoolgebouw 70 dBA bedraagt, worden deze onderbrekingen als storend en hinderend omschreven. Meet men piekgeluidsniveaus van 90 tot 95 dB of meer, dan merkt men zelfs schrikreacties bij de leerlingen. Als criterium voor het gemiddeld achtergrondgeluidsniveau in klaslokalen stelt men $L_{eq}=30$ tot 45 dBA voorop afhankelijk van het omgevingslawaai.

Continu en / of gekend geluid wordt door het gehoor weggefilterd en veroorzaakt geen afleiding. Dit wegfilteren is afhankelijk van de waakzaamheid, de aandacht, de stress en de vermoeidheid van het individu. Dit gebrek aan reactie kan door ongewone, onvoorspelbare of heel luide stimuli opgeheven worden. Afleiding door dit soort geluiden wordt als belangrijkste effect van geluid op het leergedrag aangezien.

De invloed op het uitvoeren van taken wordt verder beschreven. We vermeldde reeds dat gebleken is dat verkeerslawaai met equivalent geluidsniveau van 60 dBA nabij de waarnemer, de efficiëntie en nauwkeurigheid waarmee taken als lezen, nalezen en rekenen worden uitgevoerd nauwelijks blijkt te beïnvloeden.

Globaal kan men stellen dat in leslokalen die ontworpen werden om goede communicatie toe te laten, alle invloed van buitenlawaai op het leergedrag geëlimineerd is.

© INTEC, Universiteit Gent

1.5.3 Effect op werkprestatie

Er is weinig epidemiologisch onderzoek verricht naar de invloed van geluid op de werkprestatie en taakuitvoering. Reden hiervoor is dat gelijkaardige werksituaties met en zonder lawaai in de praktijk zelden voorkomen. Bovendien zorgt het aanbrengen van geluidwerende materialen en constructies in de werkomgeving meestal ook voor secundaire effecten die de werkprestatie in gunstige zin beïnvloeden : de werknemers krijgen meer aandacht, de algemene werkomstandigheden verbeteren.

Enkele invloeden van geluid op taakuitvoering werden uit laboratoriumexperimenten met proefpersonen afgeleid :

Invloed op de arousaltoestand

Bij de mens zijn diverse arousalniveaus mogelijk : afhankelijk van de tijd van de dag, de genoten nachtrust, het gebruik van koffie, alcohol, slaapmiddelen zal men een lager of hoger alertheidsniveau hebben. Blootstelling aan geluid verhoogt over het algemeen het arousalniveau. Geluid kan de taakuitvoering ten goede komen wanneer men bijvoorbeeld door slaapttekort of het monotone karakter van het werk in een toestand van lage arousal verkeert.

Invloed op mentale functies (horen, zien en onthouden)

Onder invloed van geluid kunnen korte onderbrekingen in de visuele taakwaarneming plaatsvinden. Over het algemeen lijkt het effect niet van praktische betekenis. Met betrekking tot het geheugen zijn drie aspecten van de invloed van lawaai bestudeerd : de capaciteit van het onmiddellijk geheugen, rehearsal (innerlijk herhalen van informatie) en semantisch clusteren (het in inhoudelijke categorieën groeperen van informatie). Op al deze aspecten kan geluid invloed hebben.

Invloed op de gebruikte strategie

Visuele waarneming, onmiddellijk geheugen en mentale operaties kunnen gezien worden als middelen om een taak uit te voeren. Deze worden met een bepaalde strategie aangewend. Resultaten wijzen erop dat onder invloed van lawaai de deelaspecten van een taak die prioriteit hadden nog sterkere prioriteit krijgen. Verder bestaan er aanwijzingen dat men onder invloed van lawaai sterker vasthoudt aan eerder ontwikkelde strategieën, ook al zijn deze niet de meest geschikte voor de uitgevoerde taak.

Neveneffecten

Een neiging tot extremer oordelen en een grotere mate aan zekerheid met betrekking tot het oordeel kunnen verondersteld worden een gevolg te zijn van de hiervoor besproken effecten van lawaai.

Merk op dat ook indien geen totaal-effect in het taakresultaat waar te nemen is, het feit dat men af en toe van de taak afgeleid wordt als hinderlijk ervaren kan worden.

© INTEC, Universiteit Gent

1.5.4 Slaapverstoring

Lawaai tijdens rustperiodes en slaap is een belangrijke oorzaak van hinder. Slaaponderbrekingen zijn meestal het gevolg van intermitterend geluid eerder dan van een continu geluid. Meestal kunnen ze geassocieerd worden met geluidgebeurtenissen zoals het voorbijrijden van transportmiddelen. Lawaai kan het inslapen verhinderen. De "hoge" geluidsniveaus die met bepaalde gebeurtenissen gepaard gaan, kunnen de natuurlijke slaappatronen onderbreken en een overgang van een diepe naar een lichtere fase veroorzaken. Dergelijke geluiden kunnen ontwaken tot gevolg hebben. Ontwaken dat door de proefpersonen al dan niet herinnerd wordt. Onafhankelijk van dit herinneren zal deze slaaponderbreking loomheid, slaperigheid en nervositeit tot gevolg hebben tijdens de dag. Algemeen kan men stellen dat hoe hoger het geluidsniveau is, hoe groter de kans op respons wordt. Figuur 1 toont de resultaten van 4 veldstudies. Het percentage ontwakenden is in deze figuur weergegeven in functie van het maximale geluidsniveau dat nabij de slaper optreedt (in dBA). Figuur 2 daarentegen toont het percentage ontwakenden in laboratoriumomstandigheden in functie van de A-gewogen geluidblootstellingsniveau. Verder weet men dat voor een typisch lawaai zoals dat van een overvliegend vliegtuig het geluidblootstellingsniveau 10 dB hoger is dan het maximale geluidsniveau. Hierdoor dan men beide grafieken vergelijken. Men leest een veel lager percentage ontwakenden af in de veldexperimenten, wat wellicht verklaard kan worden door aan te nemen dat de proefpersonen thuis gezonder en rustiger slapen.

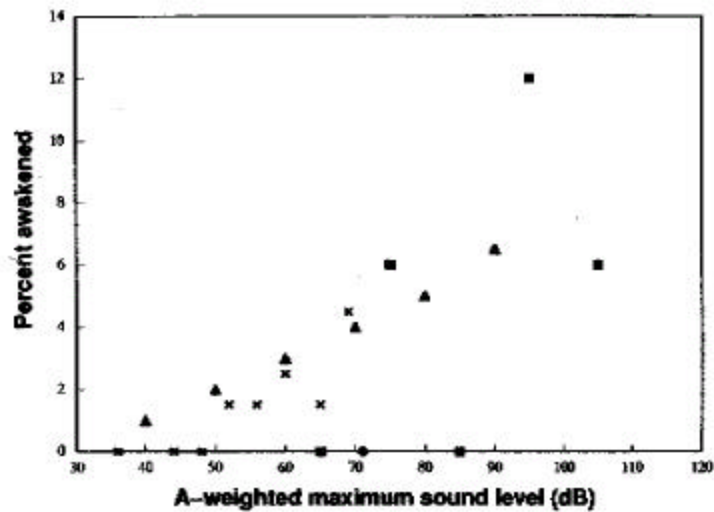


fig. 1: ontwaakpercentages voor 4 veldstudies

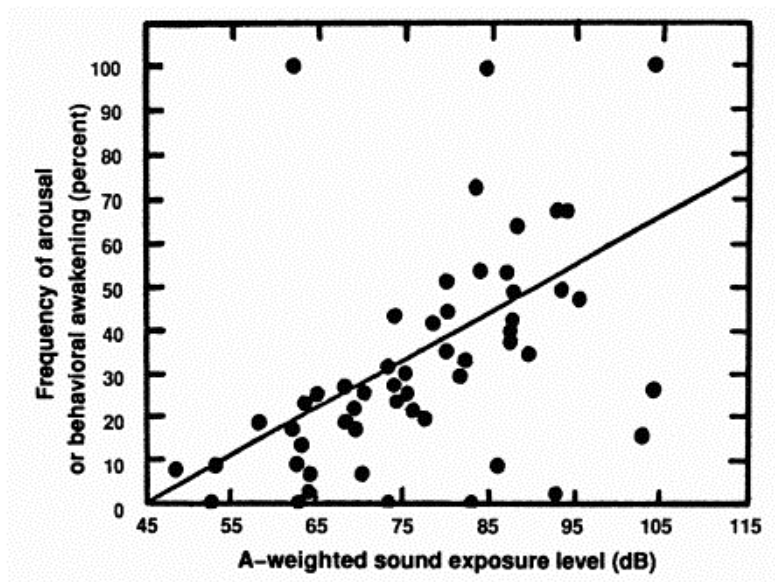


fig. 2: ontwaakpercentages voor labo-experiment

Merk op dat een vrij grote spreiding op de resultaten in de figuren waar te nemen is. Deze spreiding is grotendeels te verklaren door persoonlijke verschillen in wekdrempel. De wekdrempel is het geluidsniveau waarbij de proefpersoon ontwaakt. Deze drempel is ondermeer afhankelijk van de diepte van de slaap (dus van het tijdstip in de slaapperiode) en van de ouderdom van de proefpersonen. De wekdrempels bij kinderen liggen zo'n 10 dB(A) hoger dan die van volwassenen. Ook is gebleken dat oudere mensen (ouder dan ongeveer 60 jaar) een lagere wekdrempel hebben en meer veranderingen van slaapstadia vertonen dan jongere mensen. Ouderen zijn dus gevoeliger voor geluid tijdens de slaap dan jongeren. Tenslotte merken we op dat een zekere gewenning aan lawaai tijdens de slaap kan optreden, doch deze gewenning zal in de praktijk echter zeker nooit volledig zijn.

1.6 Geluidhinder

Lawaai is gedefinieerd als een ongewenst geluid. Het belangrijkste effect van lawaai is het stimuleren van hinder. Als hinder kan ieder gevoel van wrevel, ontstemming, onbehagen of ergernis worden aangemerkt. Geluid is alleen dan hinderlijk als het door de betreffende persoon als niet in overeenstemming met diens momentane intenties beleefd wordt. De inschatting van de hoeveelheid veroorzaakte hinder omvat dus duidelijk akoestische en niet-akoestische aspecten.

Een model voor de hinder door lawaai onderscheidt twee belangrijke akoestische factoren:

- de sterkte van een binnendringend lawaai, rekening houdend met de frequentie-inhoud en de tijdsverandering.
- de karakteristieken van het achtergrondlawaai wanneer het beschouwde geluid niet aanwezig is.

Deze twee factoren bepalen de detecteerbaarheid van het lawaai. Ook met diverse niet-akoestische factoren dienen we rekening te houden zoals:

- de graad van concentratie van de luisteraar
- de ingesteldheid en de stemming van de luisteraar m.b.t. het binnendringende lawaai.

Bij een studie naar de hinder veroorzaakt door lawaai onderscheiden we specifieke en niet-specifieke hinder. Specifieke hinder is hinder veroorzaakt door het verstoren van een bepaalde activiteit door lawaai. Men kan hier eerder spreken van verstoring door geluid. Om het onbehagen van de bevolking met een bepaald omgevingslawaai te voorspellen, steunt men het best op niet-specifieke hinder.

Sociologische studies zijn een middel om hinder vast te leggen. Deze moeten zodanig geconcentreerd worden dat ze de geïntegreerde reactie op een bepaald geluidsklimaat weergeven en niet de reactie op een recente akoestische gebeurtenis. Anderzijds kan men ook steunen op de sterkte van de actie van de populatie bij blootstelling aan een bepaald geluidsniveau.

Figuur 1 vat de resultaten van 12 sociologische studies samen. De studies omvatten vliegtuiglawaai, verkeerslawaai en treinlawaai. De lijnen geven een gemiddeld percentage sterk gehinderden in de bestudeerde populaties in functie van het L_{dn} niveau.

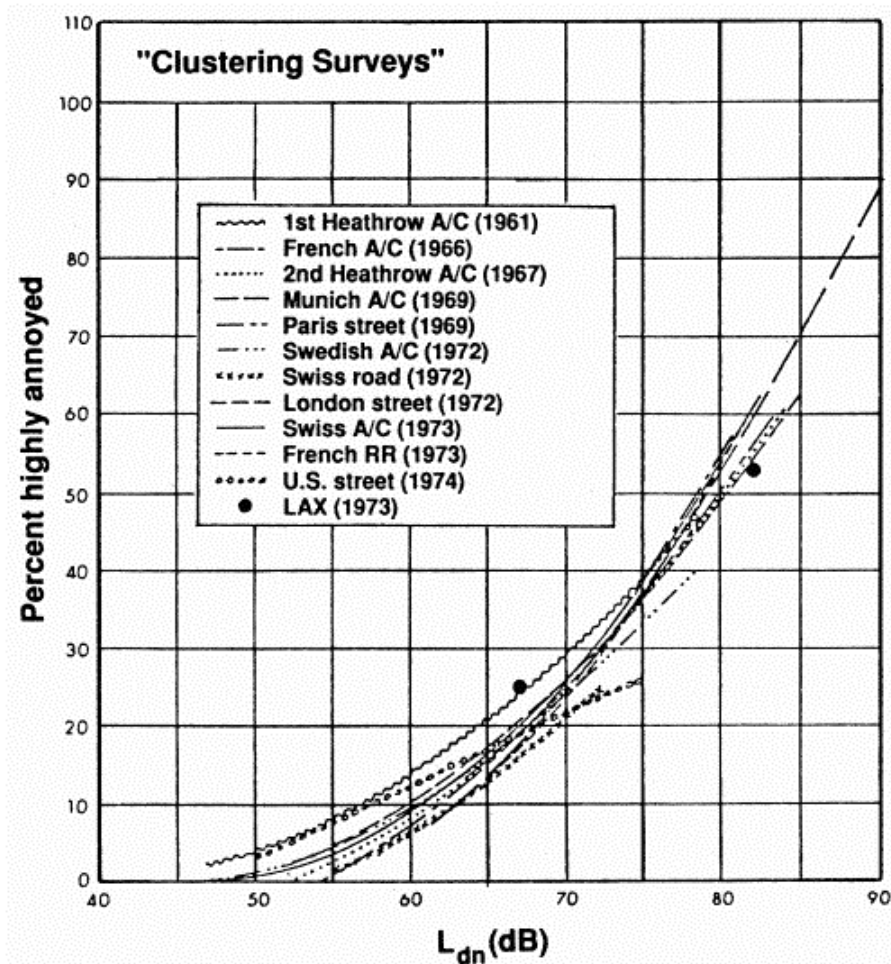


fig. 1 samenvatting van 12 hinderstudies

Bij de studie van hinder door lawaai kan men ook onderscheid maken tussen de verschillende geluidsbronnen. Voor elke geluidsbron kan men aannemen dat de frequentie-inhoud en de typische tijdsverandering constant zijn, zodat deze niet langer expliciet in rekening gebracht moeten worden. Voor verkeerslawaai merkt men bijvoorbeeld dat voor een gelijk geluidsniveau het percentage ernstig gehinderden beduidend hoger ligt voor vliegtuiglawaai en autosnelweglawaai dan voor treinlawaai of geluid van een stadsweg. Tabel 1 toont als voorbeeld de resultaten van een Nederlandse studie.

	L _{Aeq} 26 uur, in dB(A) gemeten voor de gevel						
	41/45	46/50	51/55	56/60	61/65	66/77	71/75
erger hinder							
snelweg (1 uit 6)				10	25	35	45
trein (1 uit 6)	< 5	< 5	< 5	< 5	10	5	10
vliegtuig (2 uit 10)		< 5		15	20	25	
stadsweg (2 uit 10)		< 5	< 5	5	5	0	15

tabel 1 : niet-specifieke hinder in woningen; percentage ondervraagde personen die erger hinder ondervinden

Een groot aantal studies richt zich op de actie van een gemeenschap bij blootstelling aan een bepaald lawaai als maat voor de veroorzaakte hinder. Men blijkt een goede correlatie tussen actie (reactie) van de gemeenschap en geluidsniveau te bekomen (figuur 2) als men het gemeten geluidsniveau normaliseert naar een aantal factoren waarvan men de invloed op de veroorzaakte hinder kent. Tabel 2 vat deze normaliserende factoren samen.

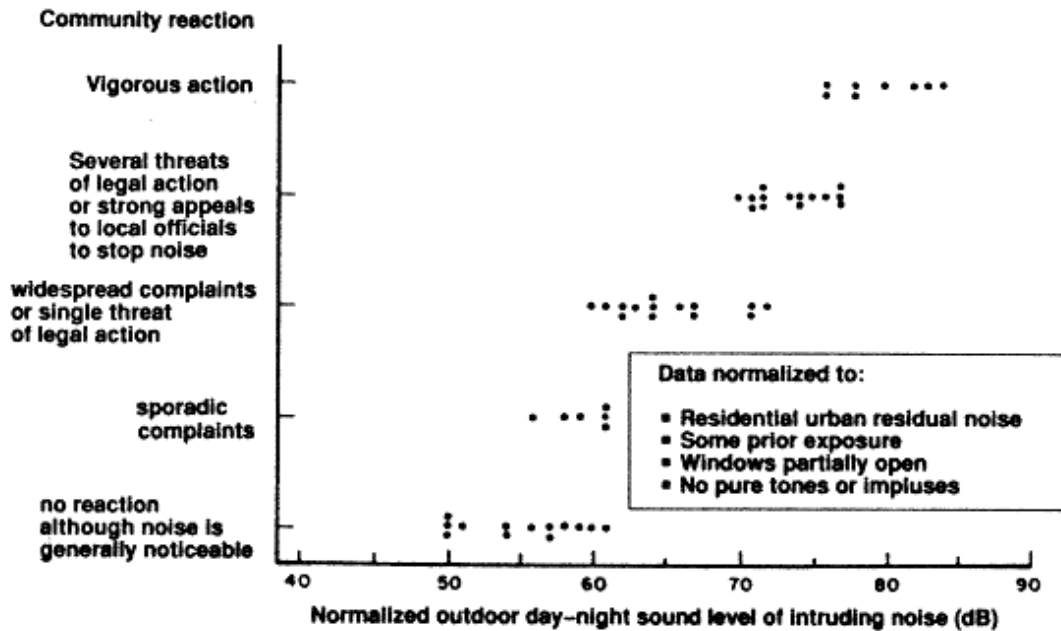


fig.2 : Gemeenschapsactie ten gevolge van diverse types lawaai als functie van genormaliseerd geluidsniveau

Type of correction	Description	Correction added to measured L_{dn} in dB
seasonal correction	Summer (or year-round operation)	0
	Winter only (or windows always closed)	-5
correction for outdoor residual noise level	Quiet suburban or rural community (away from large cities and industrial activity and trucking).	+10
	Normal suburban community (away from industrial activity).	+5
	Urban residential community (not near heavily traveled roads or industrial areas)	0
	Noisy urban residential community (near relatively busy roads or industrial areas)	-5
	Very noisy urban residential community	-10
Correction for previous exposure and community attitudes	No prior experience with intruding noise.	+5
	Community has had some exposure to intruding noise; little effort is being made to control noise. This correction may also be applied to a community which has not been exposed previously to noise but the people are aware that bona fide efforts are being made to control it.	0
	Community has had considerable exposure to intruding noise; noise maker's relations with community are good.	-5
	Community aware that operation causing noise is necessary but will not continue indefinitely. This correction may be applied on a limited basis and under emergency conditions.	-10
Pure tone or impulse	No pure tone or impulsive character.	0
	Pure tone or impulse character present	+5

tabel 2: correcties voor genormaliseerd geluidsniveau L_{dn}

Ten slotte moet opgemerkt worden dat ook in een werkomgeving geluidhinder kan bestaan. Tijdens het werk voelen mensen zich vooral gehinderd door geluid van pratende collega's. Niet-aanvaardbare geluiden zijn echter meestal geluiden afkomstig van machines, verluchtingsinstallaties e.d.

© INTEC, Universiteit Gent

1.7 Invloed van geluid op de gezondheid

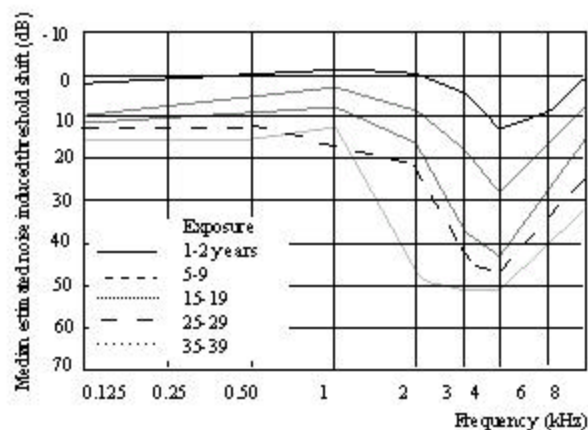
1.7.1 Gehoorbeschadiging

Aanhoudend lawaai

Als het oor wordt blootgesteld aan een hoog geluidsniveau gedurende een korte periode, dan zal een sensitiviteitstest dadelijk erna uitgevoerd een klein gehoorverlies aan het licht brengen. Dit gehoorverlies staat bekend als een tijdelijke verhoging van de gehoordrempel. Na een relatief korte periode kan de drempel tot 20dB verhogen bij bepaalde frequenties. Om een geluid direct na de blootstelling nog waar te nemen moet het dus veel luider zijn.

Als de blootstelling langer duurt of veelvuldiger voorkomt of de geluidintensiteit is groter, dan wordt de verhoging van de gehoordrempel groter en kan het gehoorverlies permanent worden. De verhoging van de gehoordrempel is bovendien cumulatief. D.w.z. dat opnieuw blootstellen na een rustperiode die niet voldoende lang was om de gehoordrempel tot zijn normaal niveau te laten relaxeren, de gehoordrempel verder zal doen stijgen. Bij mensen die 8 uur per dag jaar na jaar in een fabriek werken waar veel lawaai is, stelt men inderdaad een permanente verhoging van de gehoordrempel vast. De schade is permanent en niet omkeerbaar en zelfs een lange periode van rust zal geen noemenswaardig herstel tot gevolg hebben.

De vorm van het gehoorverlies blijkt vrij onafhankelijk van de oorzaak ervan. Bijna altijd treedt er eerst een verzwakking op bij ongeveer 4kHz, onafhankelijk de frequentiesamenstelling van het geluid dat het gehoorverlies veroorzaakt heeft. De grootste verhoging van de drempel komt altijd voor bij frequenties die hoger zijn dan deze van het geluid waardoor het gehoorverlies veroorzaakt is. Onderstaande figuur toont de evolutie van het permanente gehoorverlies door dagelijkse blootstelling aan intens lawaai. De experimentele gegevens van de figuur werden ingewonnen bij arbeiders in een jutefabriek in Schotland, waar gedurende 50 jaar dezelfde machines gebruikt werden en dus dag in dag uit hetzelfde geluidsniveau heerste. Uit de figuur kunnen de volgende interessante tendensen afgeleid worden: het gehoorverlies bedraagt zelden meer dan 20dB onder 1kHz, bij 6kHz en hoger is het gehoorverlies ook minder drastisch. Het gehoorverlies is het grootst tussen 1kHz en 5kHz en het is precies dit gebied dat het belangrijkste is bij het verstaan van spraak.



Evolutie van het gehoorverlies door lawaai

Impulsieve geluiden

Geluidimpulsen zijn belangrijk omdat ze oorzaak zijn van hinder en bovendien een gevaar voor het gehoor betekenen. Impulsieve geluiden komen vaak voor in de industrie: klinknagels slaan, materiaalbehandelingen,... en bij diverse vormen van explosies: geweer, explosieve vervorming van materiaal, ontploffingen bij wegenbouw en mijnbouw,... Ook op het eerste gezicht onschuldige zaken zoals een speelgoedpistooltje, vuurwerk,... kunnen ook sterke geluidimpulsen teweegbrengen.

Een geluidimpuls wordt gekarakteriseerd door zijn pieksterkte, zijn duur, zijn stijgtijd en eventueel zijn herhalingsinterval. Dat een puls niet als gevaar erkend wordt, vormt hierbij het grote probleem. Een puls die intens genoeg is om schade aan het gehoor te berokkenen kan nog relatief stil klinken voor de waarnemer. Bovendien zijn vele meetinstrumenten ontworpen voor continue condities en kunnen niet snel genoeg reageren op de korte stijgtijd van de pulsen. Hierdoor worden de gevaren van pulsen ook onderschat. Om geluidimpulsen nauwkeurig te evalueren moet een meetinstrument met snelle stijgtijd (50µsec. of minder) en een "peak hold" faciliteit gebruikt worden.

© INTEC, Universiteit Gent

1.7.2 Extra-auditieve effecten

Extra-auditieve lichamelijke effecten kunnen in relatie tot de blootstellingsperiode als volgt worden ingedeeld :

1. Oriëntatiereacties : reacties die optreden bij het begin van de nieuwe akoestische situatie. Deze reacties zijn erop gericht het organisme in staat te stellen zich zo snel mogelijk aan te passen aan deze nieuwe situatie, nadat deze bewust is beoordeeld. Wordt de nieuwe situatie als bedreigend ervaren, dan kunnen schrik en angstverschijnselen optreden, maar veelal zullen deze ontbreken.
2. Reacties bij kortdurende blootstelling, bijvoorbeeld gedurende 15 minuten, nadat het organisme zich heeft kunnen aanpassen aan de nieuwe situatie.
3. Reacties bij langdurige blootstelling, bijvoorbeeld een werkdag. Is er sprake van aanpassing of eerder van overbelasting?
4. Verschijnselen na jarenlange, herhaalde blootstelling aan geluid. Dit soort verschijnselen is uitsluitend door middel van epidemiologisch onderzoek aan te tonen

Over de eerste 2 effecten bestaan eenduidige studies. Ze omvatten veranderingen in bloedstroom, hartsnelheid, ademhaling, huidgeleidbaarheid, enz. Deze kortstondige effecten zijn echter weinig interessant. Correlatie tussen langdurige blootstellingen 3 en 4 en eventuele gezondheidsgevolgen is niet eenduidig aangetoond. Hoge bloeddruk, hartkwalen en andere stressgevoelige syndromen, die soms aan geluidblootstelling toegekend worden, zijn eigenlijk het gevolg zijn van een complexe interactie van vele factoren. Geluidblootstelling kan bijdragen doch eerder via de veroorzaakte hinder dan door de fysische stimulus per se. Deze psychologische stresseffecten kunnen bijvoorbeeld veroorzaakt zijn door de interactie van het lawaai met communicatie en andere dagelijkse activiteiten.

© INTEC, Universiteit Gent

2 Meten van geluid

Voor we de bruikbare meettechnieken bestuderen, stellen we ons de vraag naar het doel van geluidmetingen. Een eerste belangrijk doel kan het vaststellen van een lawaaihinderprobleem zijn. Hiervoor zijn metingen van geluidsniveaus meestal voldoende. Men wenst te beschikken over een eenvoudig, draagbaar meetsysteem. Als de hinder kortstondig is, wenst men een snelle registratie van piekniveaus. Voor langdurige observaties is een automatische uitmiddeling en statistische verwerking aangeprezen.

Een tweede doel kan het reduceren van het lawaai zijn. Meestal is het hierbij nodig de frequentie-samenstelling van het geluid te onderzoeken. Daartoe werden specifieke toestellen ontwikkeld. Meting in frequentiebanden geeft een algemeen beeld van de samenstelling terwijl het lineaire spectrum een belangrijk hulpmiddel kan zijn bij het lokaliseren van de bron van het geluid. Dat laatste is ook mogelijk aan de hand van vectoriële intensiteitsmetingen.

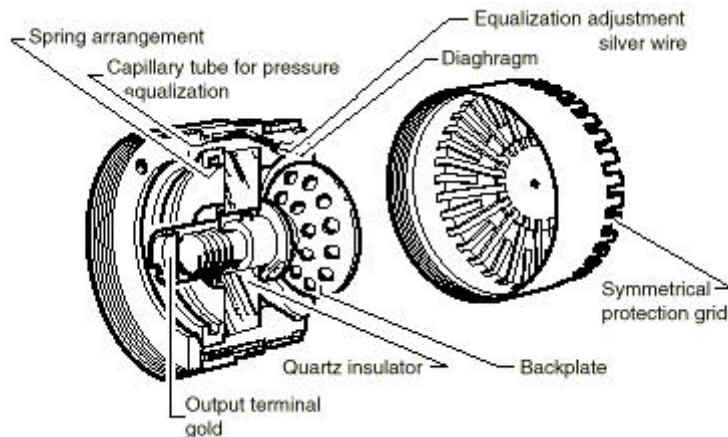
2.1 Opbouw en gebruik van een geluidsniveaumeter

2.1.1 De keuze van een meetmicrofoon

De microfoon is het kritische element in elk meetsysteem voor geluid: hij detecteert de geluidsdrukveranderingen en zet ze om in elektrische signalen. Wanneer een microfoon gekozen moet worden voor een bepaalde toepassing, dan zal met een aantal aspecten rekening gehouden moeten worden.

2.1.1.1 Condensator- en elektreetmicrofoons

Condensatormicrofoons gebruiken twee metalen platen met een luchtopening ertussen. Een van de platen is een licht membraan dat beweegt onder invloed van invallende geluidsgolven. Op de platen wordt een elektrische lading aangebracht door een hoge spanning (200 V) aan de platen te leggen. Door de beweging van het membraan verandert de lading op de condensator. Hierdoor ontstaat een elektrisch signaal evenredig met de invallende geluidsgolf. Onderstaande figuur toont de constructie van een dergelijke microfoon. Condensatormicrofoons kunnen ontworpen worden om een gevoeligheid te hebben die weinig verandert met de tijd en om een frequentieantwoord te vertonen dat zeer vlak is. Bovendien kunnen ze zeer ongevoelig zijn voor temperatuursveranderingen. Wegens deze stabiliteit zijn de condensatormicrofoons aangewezen voor precisiegeluidmetingen. Aangezien een aanzienlijke polarisatiespanning over de condensator moet aangebracht worden, kan een te hoge vochtigheidsgraad wel problemen opleveren.



Condensator microfoon (Bruel en Kjaer).

170664/1a

Om het probleem van de voorspanning (doorslag, duurdere voeding) op te lossen heeft men elektreetmicrofoons ontwikkeld. Een elektreet is een polymeerfilm waarbij een elektrische lading aan de moleculen verbonden is. Een elektreetcondensatormicrofoon wordt vervaardigd door het elektreet aan te brengen op de geperforeerde achterste metalen plaat van de condensator.

2.1.1.2 Frequentieantwoord

Als de golflengte van het waar te nemen geluid ongeveer zo groot is als de diameter van de gebruikte microfoon, dan zal de geluidsdruk gedeeltelijk weggemiddeld worden over het oppervlak van het membraan en is de microfoon dus veel minder gevoelig. Om tot hoge frequenties te kunnen meten, zal dus een kleine microfoon gebruikt worden. De totale akoestische energie die invalt op een kleinere microfoon zal echter geringer zijn, wat nadelig is voor de gevoeligheid.

Voor een 2.5cm-condensatormicrofoon (1 inch) kan men gemakkelijk nagaan dat tot een frequentie van ongeveer 8kHz het frequentieantwoord constant is met een nauwkeurigheid van ± 2 dB. De gevoeligheid van een dergelijke microfoon is typisch 50 mV/Pa¹. Wil men tot hogere frequenties meten, dan moet een 1/2-inchmicrofoon gebruikt worden. Deze is bruikbaar tot 20kHz, maar de gevoeligheid bedraagt slechts 12.5mV/Pa. 1/8-inchmicrofoons kunnen gebruikt worden voor metingen van ultrasoon geluid, of bij het opmeten van impulsgeluiden of zeer luide geluiden.

2.1.1.3 Vrijeveld en random-invalmicrofoon

Het vrije veld is gedefinieerd als een gebied waarin geen gereflecteerde geluidsgolven voorkomen. De microfoon zelf zal het veld echter verstoren. Men heeft dan ook microfoons ontwikkeld die de invloed van de microfoon op het veld compenseren: de vrijeveldmicrofoons. De hoogste nauwkeurigheid wordt bereikt als een dergelijke microfoon naar de bron wordt gericht (figuur 3.2a).

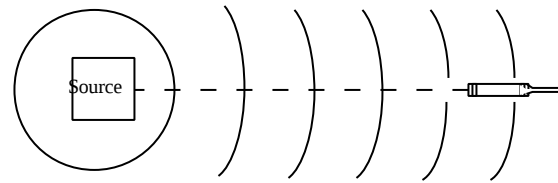
Een diffuus geluidveld wordt gegenereerd door meervoudige reflecties van het geluid. Voor metingen in een diffuus veld is een random-invalsrichtingmicrofoon ontwikkeld. Deze microfoon compenseert de invloed van de aanwezigheid van de microfoon in een diffuus geluidveld.

Een drukmicrofoon geeft een constante frequentieresponsie van het geluidveld zoals het bestaat, inclusief de invloed van de microfoon zelf.

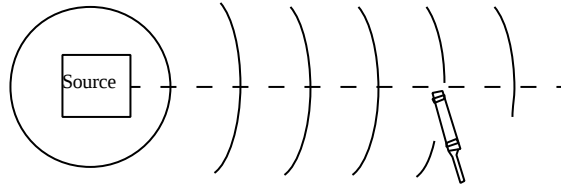
De drie microfoontypes kunnen ook in een ander type veld gebruikt worden, dan dat waarvoor ze ontwikkeld zijn: Drukmicrofoons kunnen in diffuse velden gebruikt worden. Als een vrijeveldmicrofoon in een diffuus veld gebruikt wordt, dan moet een elektronische correctie doorgevoerd worden. Wordt een random-invalsrichtingmicrofoon gebruikt in een vrij veld, dan moet de microfoon 70° à 80° gedraaid worden t.o.v. de richting van de bron (zie onderstaande figuur). Een drukmicrofoon moet in een vrij veld onder een hoek van 90° t.o.v. de bron geplaatst worden (figuur: rakelingse inval).

Het Amerikaans Nationaal Standaard Instituut (ANSI) baseert zich op random-invalsrichtingmicrofoons voor het opstellen van zijn normen in verband met omgevingsgeluid, de Internationale Electrotechnische Commissie (IEC) baseert zich op vrijeveldmicrofoons.

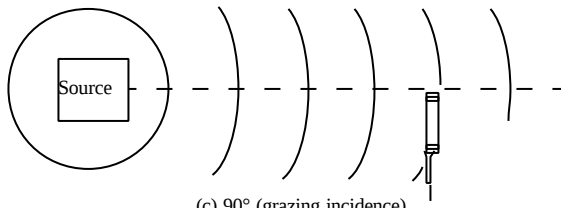
¹ Voor een invallende geluidsdruk van 1 Pa zal een elektrisch signaal van 50 mV op de elektrische klemmen ontstaan.



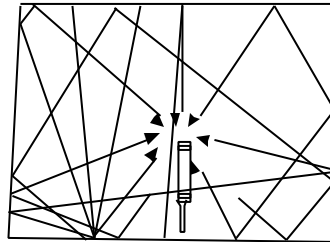
(a) 0° incidence



(b) 70 tot 80° incidence



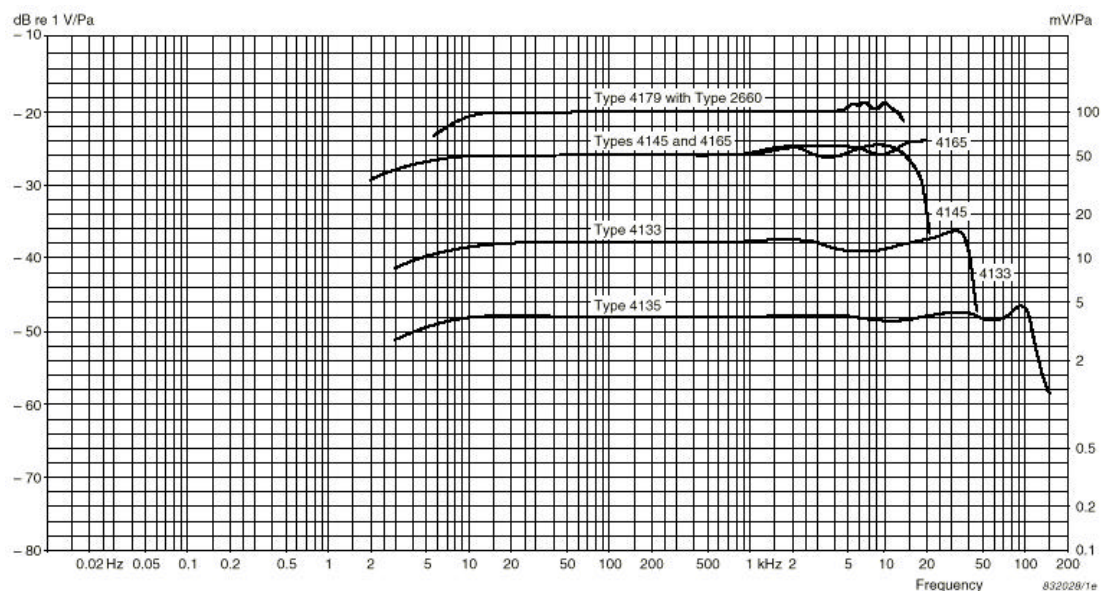
(c) 90° (grazing incidence)



(d) Diffuse-field measurement

Microfoonoriëntatie.

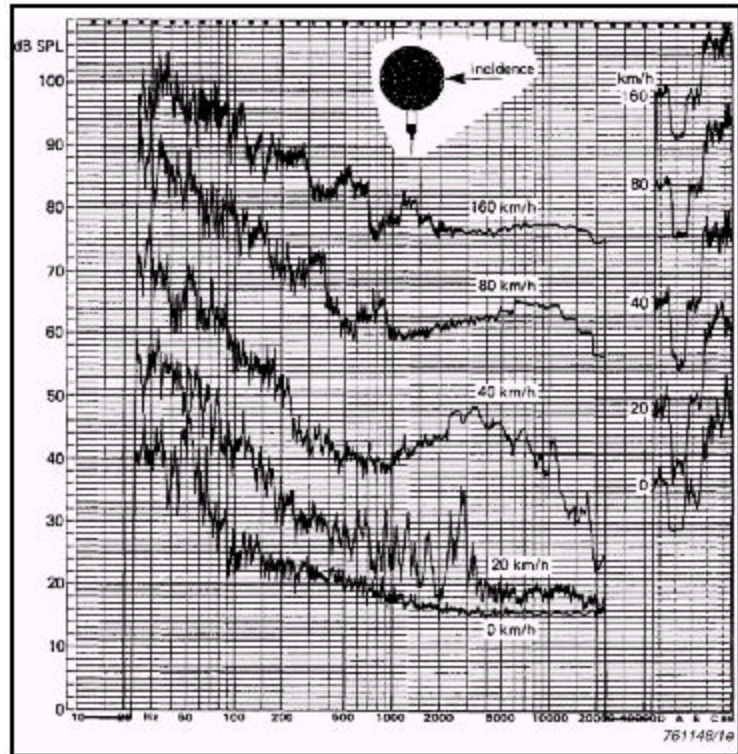
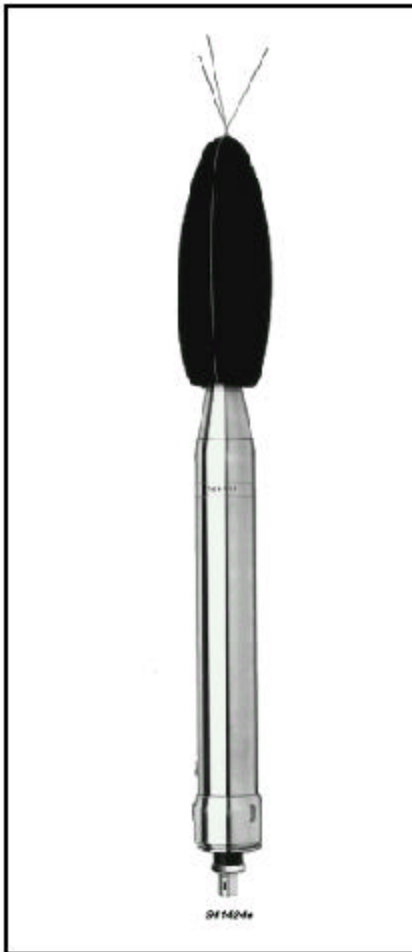
Onderstaande grafiek toont de respons van enkele vrijeveldmicrofoons in functie van de frequentie. De nummers verwijzen naar verschillende types van deze constructeur en hebben volgende afmetingen 4179= 1 inch, 4145= 1 inch, 4165= ½ inch, 4133= ½ inch, 4135= ¼ inch.



2.1.1.4 Windschermen

De aanwezigheid van een microfoon in een bewegende luchtstroom veroorzaakt turbulenties die door het meetinstrument als geluidssignaal gedetecteerd worden (cf. geruis van de wind in een microfoon verbonden met een audioinstallatie). Voor metingen in openlucht is het dan ook noodzakelijk een windbol te gebruiken. Het windscherm dempt de turbulente stroming in belangrijke mate. Akoestisch zijn windschermen essentieel transparant in het interessante frequentiegebied. Typisch zorgt het windscherm voor 0.5dB attenuatie bij 5kHz, terwijl de attenuatie oploopt tot 2dB bij 12kHz.

Onderstaande figuur toont een windscherm voorzien van zogenaamde 'birdspikes', die noodzakelijk zijn om bij permanente meetopstellingen de vogels te verhinderen op de microfoon te landen. Uit de meting van de windruis (rechts) is af te leiden dat windruis vooral laagfrequent is en dat windruis bij snelheden boven 40 km/h ook met gebruik van een windbol nog belangrijk blijft. Bij dergelijke hoge windsnelheden worden geluidmetingen in open lucht best uitgesteld.



2.1.1.5 Fast-slow

Een typisch meettoestel bestaat uit een 1-inch of een 1/2-inch-microfoon, een voorversterker, wegingsnetwerken, nog een versterker, een rms-gelijkrichter en een meter, die het geluidsniveau in dB aangeeft. Een schakelaar laat toe te kiezen tussen A-, B-, C-, D-weging of helemaal geen weging. Uiteindelijk wordt het gelijkgerichte signaal omgezet in dB en aan een analoog of digitaal uitleesinstrument gevoed. De snelheid waarmee de meter veranderingen van het geluidsniveau volgt is vaak instelbaar. In de "fast" mode is de tijdsconstante ongeveer 1/8 sec. In "slow" mode wordt de tijdsconstante ongeveer 1 sec. In de "slow" mode maakt het toestel dus een middeling over het geluidsniveau gedurende de voorbijse seconde. Sommige toestellen hebben een "impulse" en een "peak hold" mogelijkheid, waarmee het maximum van een geluidssignaal in een bepaalde periode kan vastgehouden worden.

2.1.2 Kalibratie

Een meetmicrofoon wordt geleverd met een kalibratiekaart waarop de frequentiegevoeligheid is weergegeven. Er bestaan verschillende kalibratietechnieken voor microfoons of voor totale meetsystemen. Voor het meten van geluidsdrumniveaus bekomt men de beste resultaten wanneer men een pistonfoon gebruikt voor de kalibratie van het meetsysteem. Een pistonfoon, ook zuigerkalibrator genoemd, bestaat uit een motor die een paar zuigers heen en weer beweegt. Dergelijke pistonfoon genereert typisch een geluid van 250 Hz, 124 dB. De frequentie van 250 Hz wordt bepaald door de beperking van de snelheid waarmee de zuiger op en neer bewogen kan worden

2.1.3 Correcte meting bij achtergrondgeluid

Bij het opmeten van het geluid veroorzaakt door een bepaalde bron, worden alle andere aanwezige geluiden beschouwd als achtergrondlawaai. In de praktijk ontmoet men slechts uitzonderlijk een omgeving waar geen achtergrondgeluid bestaat (b.v. anechoïsche kamer). Is het niveau van het achtergrondgeluid 20dB lager dan het totaal geluidsniveau, dan kan men het gerust verwaarlozen. Is het slechts 10dB lager, dan is een correctie noodzakelijk, maar als het achtergrondgeluidsniveau maar 5dB onder het totale geluidsniveau ligt, dan is een correcte meting onmogelijk.

Stel dat we het geluidsniveau L van een bron die zich in een omgeving met een achtergrondgeluidsniveau L_B bevindt, wensen te bepalen. Het gecombineerde geluidsniveau (achtergrond + bron) is L_C . L_B en L_C zijn dus opgemeten grootheden, L is de waarde die we wensen te bepalen. Aangezien de bron en het achtergrondgeluid zeker niet met elkaar gecorreleerd zijn, moeten de gemiddelde kwadratische geluidsdrukken van het gecombineerde geluid en van het achtergrondgeluid van elkaar afgetrokken worden om de bronterm te bekomen. Rekening houdend met de definitie van geluidsdrumniveau vinden we:

$$L = 10 \log \frac{p_{C,rms}^2 - p_{B,rms}^2}{p_{ref}^2} = 10 \log(10^{L_C/10} - 10^{L_B/10})$$

Of als X gedefinieerd wordt als $X = L_C - L_B$

$$L = L_C + 10 \log(1 - 10^{-X/10})$$

Met deze uitdrukking kan de meting dus gecorrigeerd worden voor het achtergrondgeluid.

2.1.4 Verstoring van metingen door waarnemer en apparatuur

De aanwezigheid van de instrumenten en de waarnemer in het geluidveld zullen de metingen verstoren. Als het gaat om metingen in een diffuus veld dan zal de fout meestal gering blijven. Wenst men nabij een bron op te meten, dan plaatst de waarnemer zich vanzelfsprekend buiten de directe verbindinglijn tussen de bron en het meetinstrument. Liefst plaatst men het meetinstrument op een driepoot en gaat de waarnemer minstens 0.5m achteruit en zijwaarts. Octaafband of smalband metingen zijn veel gevoeliger aan de aanwezigheid van een waarnemer. Meestal zal men in dit geval de meetmicrofoon op een driepoot monteren en met een kabel van minstens 1.5m lengte met de rest van de apparatuur verbinden. Bij metingen in een anechoïsche kamer zullen alle meetapparatuur (behalve de microfoon) en de waarnemer zich buiten de kamer bevinden.

2.2 Meten van spectrale informatie

Spectrale informatie is vereist om de oorzaak van geluidsoverlast te identificeren, om de invloed van maatregelen te berekenen op de geluidimmisatie en om specificaties van bronnen en materialen vast te leggen. Afhankelijk van de toepassing zal men opteren voor een octaafbandspectrum (niet-lineaire frequentieas) of een FFT-spectrum (lineaire frequentieas).

2.2.1 Octaafbanden

Voor audiotoeepassingen strekt het globale frequentiegebied zich uit van 20 tot 20000 Hz. Dit frequentiegebied wordt voor de akoestische toepassingen opgedeeld in frequentiebanden met een bandbreedte die evenredig is met de middenfrequentie. De frequentiebanden worden benoemd volgens hun middenfrequentie. De basisfrequentie is 1000 Hz.

$\log_2(f_2/f_1)$ is gedefinieerd als het octaafgetal. B.v. wanneer f_2 het dubbele is van f_1 , spreken we van een octaaf. Het octaafgetal is dan gelijk aan 1. De middenfrequenties voorafgaand aan en volgend op 1000 Hz worden dus gevonden door te delen door respectievelijk te vermenigvuldigen met 2. We spreken dan van de 1/1-octaafbandmiddenfrequenties. Op dezelfde manier vinden we de 1/3-octaaf of terts-middenfrequenties door te delen door en te vermenigvuldigen met

$$\sqrt[3]{2}$$

Men kan de octaafbanden ook fijner opdelen. Men spreekt dan van 1/n-octaafbandbreedte. De norm ISO 266-1975 legt de opdeling in banden van het volledige voor audio-toepassingen relevante frequentiegebied vast.

Toepassingen:



In onderstaand voorbeeld hoor je een opeenvolging van de volgende octaafmiddenfrequenties: 125, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz en 2000 Hz.

Het volgende voorbeeld laat de volgende tertsmiddenfrequenties horen: 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315, 400 en 500 Hz.

Gevoelsmatig leren we uit deze beide voorbeelden dat het gebruik van octaven en tertsen zinvol is.

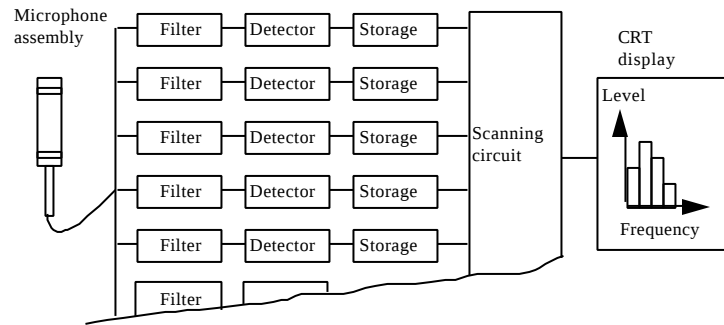


Klik voor een tabel met de middenfrequenties.

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

2.2.1.1 Meettechnisch

Om het geluidsniveau in een octaafband te bepalen stuurt men het signaal afkomstig van de microfoon door een filter dat precies deze frequenties doorlaat die binnen de beschouwde octaafband liggen. Na berekening van de rms-waarde en omzetten in dB kent men dadelijk het niveau in deze frequentieband. Men kan achtereenvolgens voor verschillende banden deze werkwijze herhalen. Bij moderne toestellen bekomt men zogenaamde reële tijdsanalyse door alle gewenste octaaf- of tertsbanden gelijktijdig te analyseren. Het proces wordt geïllustreerd in onderstaande figuur.



Schematische voorstelling van de werking van een toestel voor reële tijdsanalyses.

Meestal wordt digitaal filteren van een gesampled tijdssignaal gebruikt. Het signaal wordt aan een stel parallelle filters, detectors en opslagcomponenten toegevoegd. Na de parallelle verwerking kan een reële tijdsdisplay getoond worden. Meestal zal men echter geïnteresseerd zijn in een gemiddelde over een zekere periode b.v. de tijd dat een vrachtwagen voorbij rijdt of een vliegtuig overvliegt. Daartoe is de optie exponentiële middeling (slow/fast) en de optie lineaire middeling (Leq) voorzien. Sommige toestellen laten ook toe om statistische niveaus per octaafband te bepalen. A-weging kan al dan niet toegepast worden. De resultaten van het meetinstrument kunnen aan een computer doorgegeven worden voor verdere verwerking en op diverse manieren uitgelezen worden.

2.2.1.2 Toepassingen

- Omdat de octaafbanden het hoorbare frequentiegebied opsplitsen in een klein aantal intervallen (10 stuks) is het zeer interessant om allerlei berekeningen die afhankelijk zijn van de frequentie van het geluid, uit te voeren. Als basis voor berekeningen of ter controle moet het octaafbandspectrum natuurlijk gemeten kunnen worden.
- Tertsbandspectra kunnen gebruikt worden om na te gaan of het geluid op een bepaalde waarnemingsplaats belangrijke tonale componenten bevat. Dit is nodig in verband met het onderzoeken van het hinderlijk karakter van het geluid.

2.2.2 FFT spectra

FFT is een letterwoord voor Fast Fourier Transform en verwijst naar een snel algoritme dat op digitale signalen wordt toegepast om snel hun Fourierspectrum te bepalen. Voor toepassingen in het domein van omgevingslawaai volstaat het meestal het vermogen bij verschillende frequenties te kennen. Men gebruikt dan het vermogenspectrum.

2.2.2.1 Fouriertransformatie

Veronderstel dat een signaal integreerbaar is over de ganse tijdsas. Dit veronderstelt onder meer dat de signalen moeten dempen in het oneindige. Voor deze signalen kan men een **Fouriergetransformeerde** (FT) definiëren als volgt:

$$Fp(f) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \cdot e^{-i2\pi f t} dt$$

lees dit als 'de Fouriergetransformeerde van $p(t)$ met frequentie f is'. Natuurlijk een functie kan men altijd transformeren naar om het even wat, de vraag is echter of men door inverse transformatie terug kan naar de oorspronkelijke functie, en bovendien is het de vraag

of de transformatie een meerwaarde aan informatie over het signaal geeft, slechts dan worden deze bewerkingen zinvol. In bovengenoemd geval bestaat de invertering , nl :

$$p(t) = F^{-1}p(f) = \int_{-\infty}^{\infty} Fp(f)e^{i2\pi f t} df$$

Op analoge wijze als bij Fourierexpansies wordt $Fp(f)$ de Fouriergetransformeerde (Fourierspectrum) van $p(t)$ genoemd en is dus nu continu, de variabele f is wel degelijk een continue frequentievariabele.

In de praktijk digitaliseert men het analoge akoestische signaal tot een reeks van getallen s_m . Bovenstaande Fouriertransformatie wordt hierdoor omgezet in een numerieke (digitale) berekening waarbij N -samples van het tijdsignaal omgezet worden in N -samples van het frequentiespectrum S_k .

2.2.2.2 Fastfouriertransformatie (FFT)

Directe implementatie van de DFT van N -samples veronderstelt het uitvoeren van een complexe matrix van $N \times N$ elementen en dus N^2 bewerkingen. Wanneer echter het **aantal samples een macht van 2** is

$$N = 2^p$$

dan kan het aantal bewerkingen herleid worden tot $N \cdot \log_2 N$. Dit maakt de berekening véél sneller en zeer efficiënt in geheugengebruik van de computer.

Dit turboalgoritme staat bekend in de literatuur als de Fast Fourier Transform of kortweg FFT. Er zijn echter vele varianten op deze techniek bekend , de meeste zijn geïmplementeerd in vele computertalen zoals Visual Basic, C, Labview (die wij hier gebruiken in de voorbeelden) enz . Wij gebruikendus uitsluitend dit algoritme in onze voorbeelden.

Zero padding

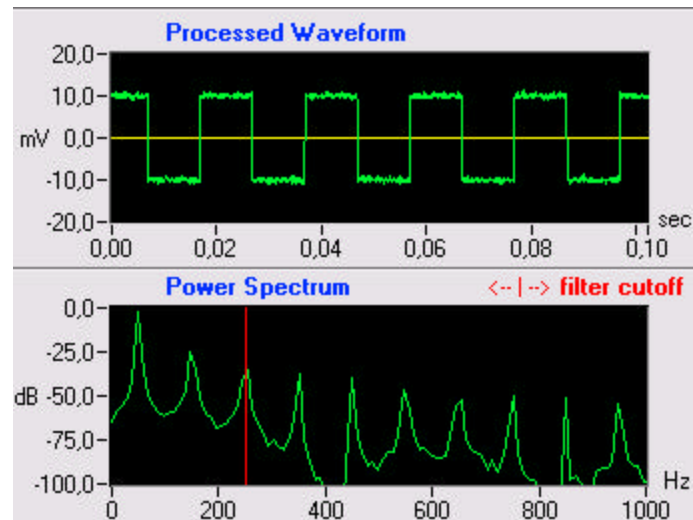
Wat als de grootte van de sample geen macht van 2 is , is er geen FFT? Toch wel. Men voegt dan nullen toe op het einde van de sample tot het aantal elementen een macht van twee is. Deze operatie verandert het spectrum van het signaal niet !! Niet alleen verloopt de berekening bovendien veel vlugger maar, ook de spectrale resolutie wordt beter, immers $\Delta f = f_N$ en N neemt toe door padding met nullen.

2.2.2.3 Vermogensspectrum

Net zoals bij continue signalen is men veelal geïnteresseerd in de hoeveelheid energie in het signaal en in een frequentiecomponente. En net zoals in het continue geval is dit evenredig met het kwadraat van het amplitude van die componente (een gevolg van het Parsival theorema):

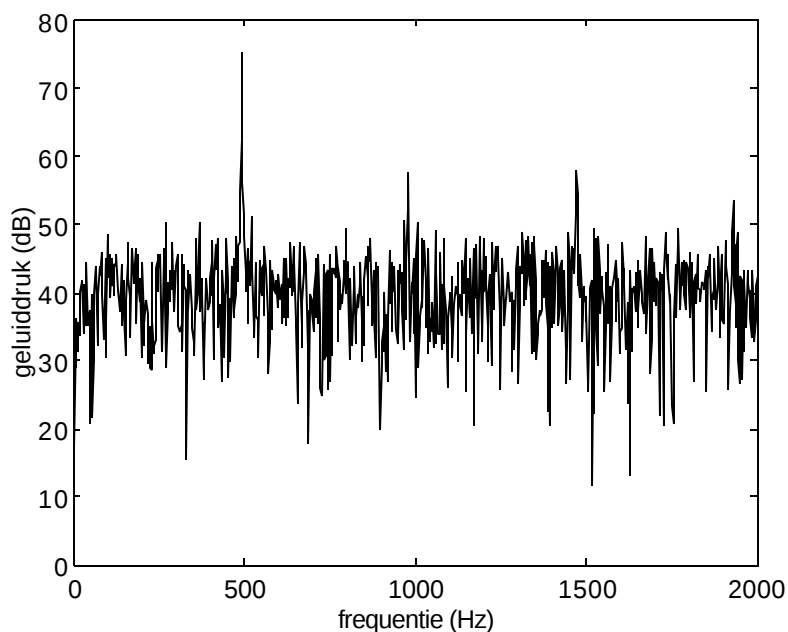
De energie in de spectrale componente k wordt gegeven door (in feite is zij slechts evenredig met) $C^2 k$. Het zijn deze grootheden die afgebeeld worden in het vermogensspectrum van het signaal. Meestal is dit vermogensspectrum ook het enige waarin de akoestiek, maar niet audio, geïnteresseerd is en wat dus afgebeeld wordt !

Men weze er zich echter van bewust dat in dat geval de reconstructie van het signaal niet mogelijk is omdat de fase-informatie verloren gegaan is!



2.2.2.4 Toepassingen

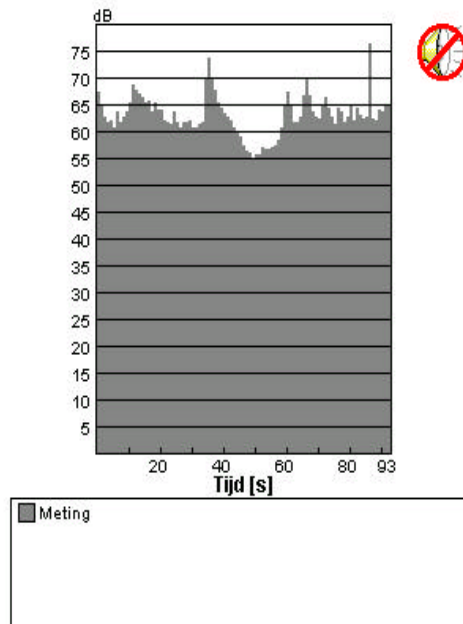
- Tonale componenten in het omgevingsgeluid kunnen de hinder verhogen. FFT-spectra zijn beter geschikt om ze te identificeren.
- FFT-spectra laten in sommige gevallen toe de herkomst van een geluid te achterhalen. Voorbeeld: Een motor met toerental 1470 tr/min drijft een ventilator aan met 20 schoepen. Het geluid ontstaat door interactie van een schoep met de instroom. Voor deze bron van geluid is de situatie om de $1/(1470 \cdot 20/60) = 1/490$ seconden identiek. We kunnen een frequentie van 490 Hz verwachten in het geluid van de ventilator. Stel dat we op grote afstand onderstaand geluidsspectrum opmeten, dan kunnen we met vrij grote zekerheid stellen dat de piek in het spectrum afkomstig is van de ventilator.



2.3 Meten van geluid over langere periodes

We zullen in deze leereenheid een manier opstellen om fluctuerende geluiden te karakteriseren. In onderstaande figuur is het tijdsverloop van zo'n typisch fluctuerend geluid te zien.

Voorbeeld



Uit dit tijdsverloop blijkt duidelijk dat dit geluid niet te karakteriseren is met één meting op een bepaald tijdstip, omdat het geluid te snel verandert. Een meting op een bepaald tijdstip stelt ons niet in staat een voorspelling te doen in verband met het geluid dat we b.v. 2 seconden later meten.

Denk eens na over de volgende vraag, alvorens verder te gaan.
Hoe zou je zulke fluctuerende geluiden kunnen karakteriseren?

2.3.1 L_{eq}

Om geluiden die sterk fluctueren te kunnen karakteriseren, voeren we een equivalent geluidsniveau in.

Definitie

Het *equivalent continu geluidsniveau* $L_{eq,T}$ is het constante geluidsdruk niveau dat gedurende het tijdsinterval T dezelfde geluidenergie zou veroorzaken als het werkelijk gemeten geluidsdruk niveau gedurende hetzelfde tijdsinterval T.

We bekomen dit equivalent geluidsniveau, afgekort L_{eq} , van een bepaald geluidssignaal door de gemiddelde kwadratische geluidsdruk over het gewenste tijdsinterval $[0, T]$ uit te middelen en vervolgens terug om te zetten in dB.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} dt \right)$$

Uit de definitie van [geluidsdruk niveau](#) volgt:

$$\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} = 10^{\frac{L_p}{10}}$$

Zodat de eerste vergelijking als volgt kan worden uitgedrukt:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt \right)$$

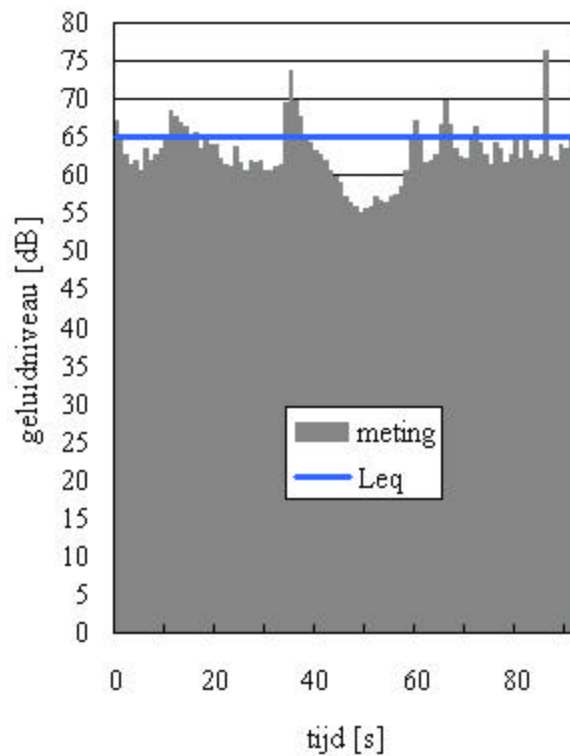
In de numerieke berekeningen wordt de integratie vervangen door een sommatie over een set van N metingen L_i .

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Het equivalent geluidsniveau kan als volgt geïnterpreteerd worden. Een constant geluid van dit niveau bevat evenveel akoestische energie als het sterk variërende geluid waarvan de L_{eq} berekend werd.

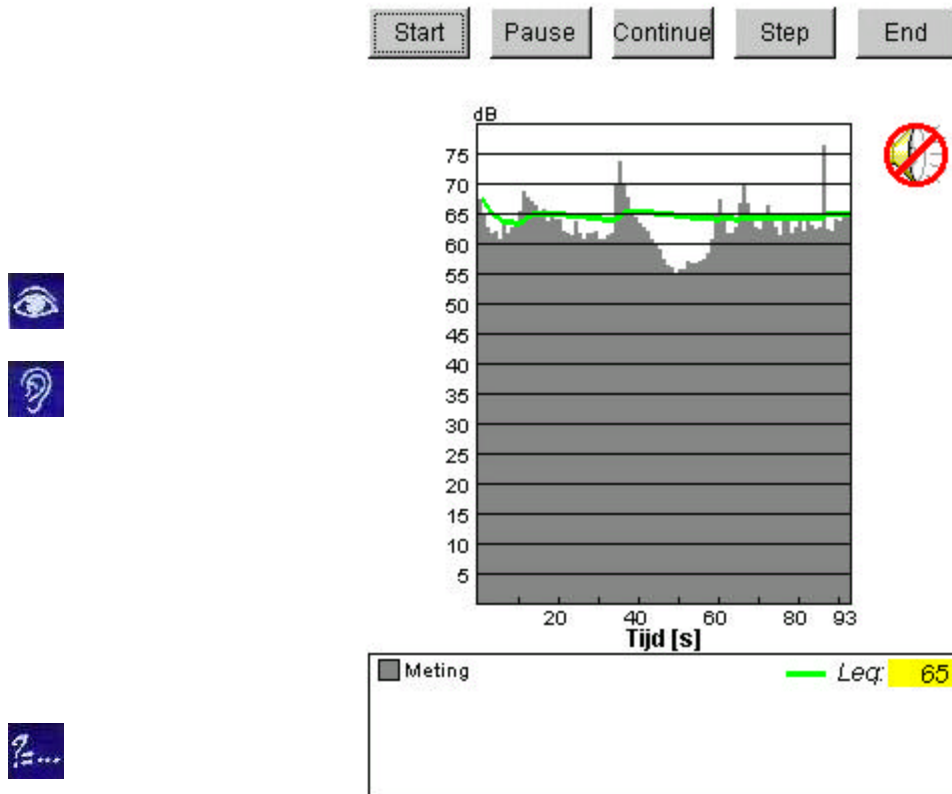
Voorbeeld

In dit voorbeeld berekenen we het equivalent geluidsniveau van het geluidssignaal van het voorbeeld uit de inleiding en stellen we dit grafisch voor. Het equivalent geluidsniveau bedraagt 65 dB.



Opmerking

We kunnen ook in plaats van het equivalent geluidsniveau te berekenen over de volledige tijdsperiode van het signaal, na iedere seconde het equivalent geluidsniveau bepalen over het reeds voorbijge tijdspanne en de gevonden waarde uitzetten in een grafiek. Dat is wat er gebeurt in de volgende applet. We krijgen nu natuurlijk geen horizontale lijn meer, maar als de volledige tijdsperiode verstreken is en het equivalent geluidsniveau over de volledige tijdsperiode berekend is, krijgen we net als in het vorig voorbeeld 65 dB.



Opmerking

In de meeste gevallen wordt het equivalent geluidsniveau bepaald op basis van het A-gewogen geluidssignaal, dit wordt als volgt genoteerd: $L_{Aeq,T}$

2.3.2 L_N

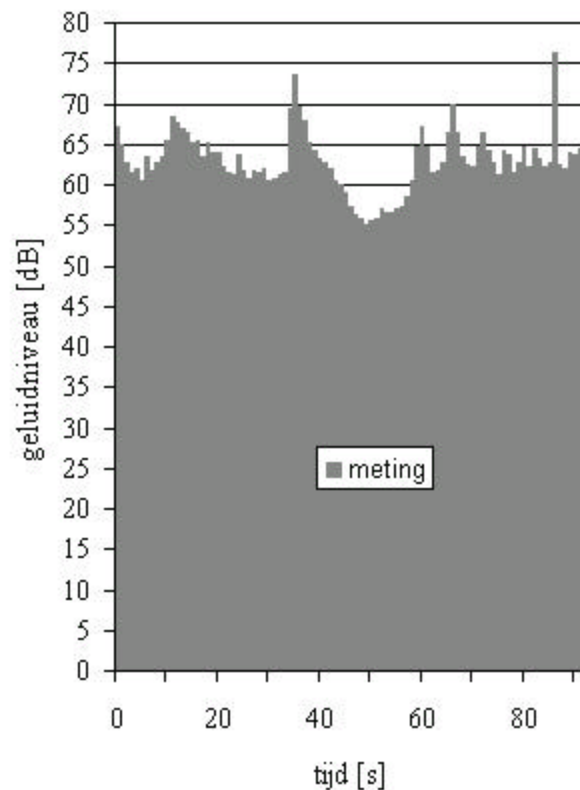
Om geluiden die fluctueren in de tijd te karakteriseren moeten we een statistische beschrijving ontwikkelen. We definiëren eerst het *statistisch geluidsniveau*.

Definitie

Het *statistische geluidsniveau*, voorgesteld als L_N , is het geluidsniveau dat gedurende N procent van de observatietijd overschreden wordt, genoteerd als $L_{N,T}$.

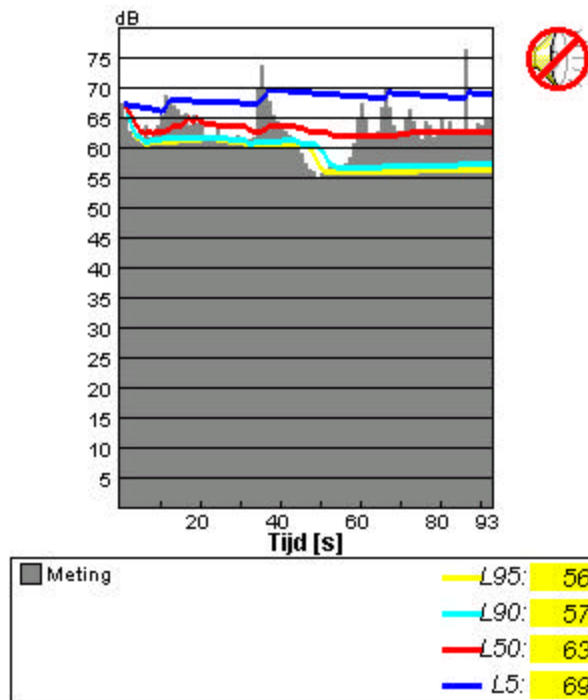
Voorbeeld

In de onderstaande figuur is het tijdsverloop van het fluctuerend geluid uit de inleiding te zien. Maak een schatting voor de L_5 , L_{10} , L_{50} en L_{90} .

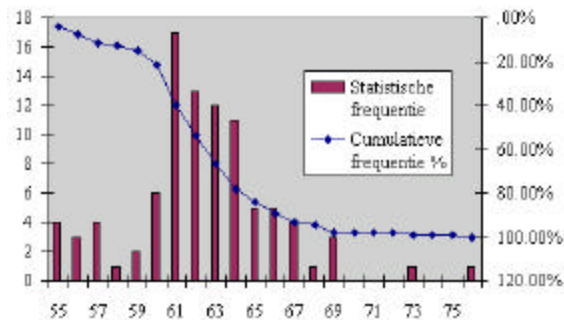


Net zoals dat bij het equivalent geluidsniveau het geval is, kunnen we ook hier in plaats van de statistische geluidsniveaus te bepalen over de volledige tijdspanne van het signaal, na iedere seconde de statistische geluidsniveaus bepalen over het reeds voorbijge tijdinterval. Dit is wat er gebeurt in de volgende applet.

Start Pause Continue Step End



Deze statistische geluidsniveaus kunnen manueel bepaald worden, door het inkomende geluidssignaal te samplen en dit statistisch te verwerken. Daarvoor verwijzen we naar de [beschrijving van datasets](#). Daar wordt uitgelegd hoe de cumulatieve distributiefunctie opgebouwd wordt en hoe daaruit de statistische geluidsniveaus onmiddellijk afgelezen kunnen worden



Opmerking

In veel gevallen worden de statistische niveaus berekend op basis van het [A-gewogen geluidssignaal](#), de A-gewogen statistische geluidsniveaus worden als volgt genoteerd: $L_{AN,T}$

© INTEC, Universiteit Gent

2.3.3 Toepassingen

- [Wetgeving \(VLAREM II\)](#)
- [Analyse van het geluid](#)
- [Meettechnisch](#)

© INTEC, Universiteit Gent

2.3.3.1 Wetgeving



Een eerste toepassing situeert zich in het domein van de wetgeving ([VLAREM II](#)). Ter hoogte van verschillende meetpunten dient het heersende omgevingsgeluid statistisch onderzocht te worden. De weerhouden statistische parameters $L_{AN,T}$ omvatten minstens $L_{A95,1h}$, $L_{A50,1h}$, $L_{A5,1h}$ en de $L_{Aeq,1h}$ voor elk uur van het etmaal. Op basis van de metingen over meerdere dagen wordt voor elk uur van het etmaal het rekenkundig gemiddelde bepaald voor de meetwaarden bekomen onder gelijkwaardige omstandigheden.

Van de gemeten $L_{A95,1h}$ waarden worden zowel voor de dag, de avond als de nacht een gemiddelde waarde vastgelegd. Op basis van deze dag-, avond- en nachtwaarden en op basis van de richtwaarde voor het betreffende gebied zal het specifieke geluid van de exploitatie geëvalueerd worden.

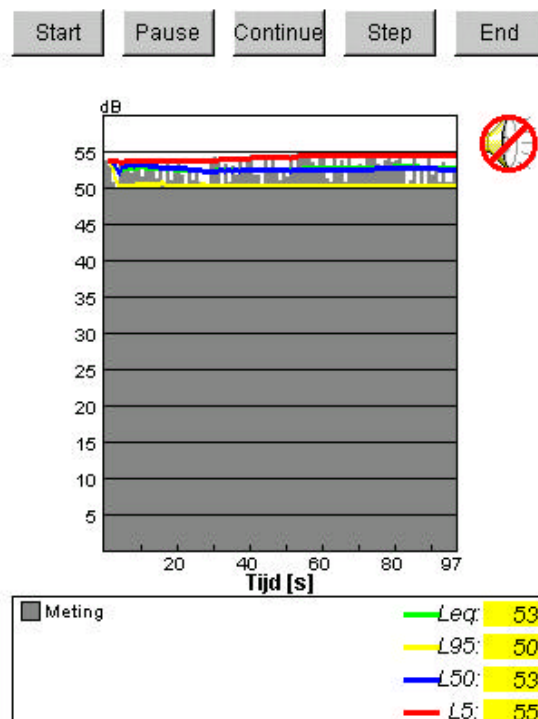
© INTEC, Universiteit Gent

2.3.3.2 Analyse van geluid

Met behulp van de statistische geluidsniveaus kunnen we nagaan wat het steeds aanwezige geluidsniveau is en hoe hoog het geluidsniveau is, wat door de pieken (events) veroorzaakt wordt. Dergelijke analyse van geluid kan interessante informatie leveren voor de ervaring van hinder veroorzaakt door een bepaald geluid. In sommige gevallen zal de karakterisatie van de geluidspieken ($L_{A5,T}$ meer informatie leveren inzake geluidhinder dan een of andere gemiddelde waarde.

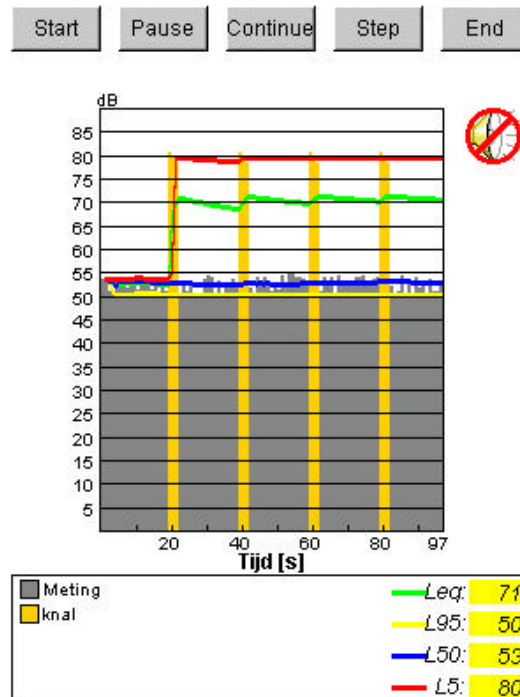
Zo kan de L_{95} gebruikt worden om het achtergrondgeluid te karakteriseren, de piekgeluiden kunnen gekarakteriseerd worden met behulp van de L_5 of L_{10} . Dit wordt geïllustreerd in onderstaande grafieken. Merk op dat plotse kortstondige luidruchtige events geen invloed hebben op de L_{95} gemiddeld over langere periodes.

Onderstaande applet toont het geluidverloop in een bepaald meetpunt.

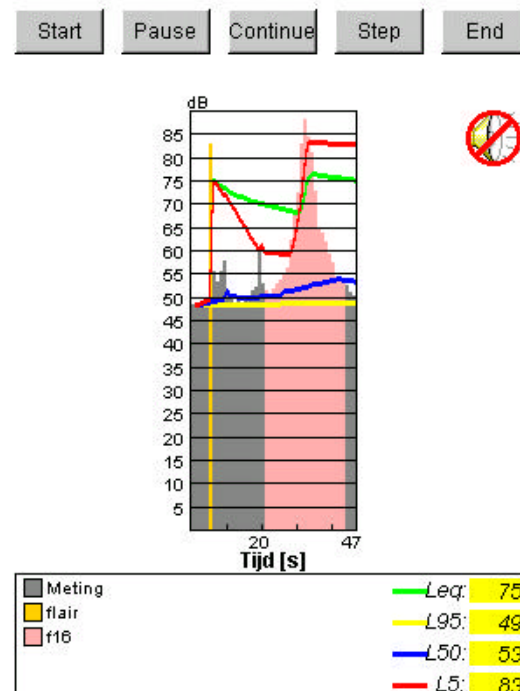


Onderstaande applet toont een geluidsoptname ter hoogte van hetzelfde meetpunt, nu met een bijkomende geluidsbron. Op regelmatige tijdstippen wordt met regelmatige tussenpozen een flair afgeschoten.

De L_{A95} en de L_{A50} zijn ongewijzigd, terwijl de L_{Eq} en de L_5 sterk toegenomen zijn. Dergelijke piekgeluiden worden dus het best gekarakteriseerd met behulp van de L_5



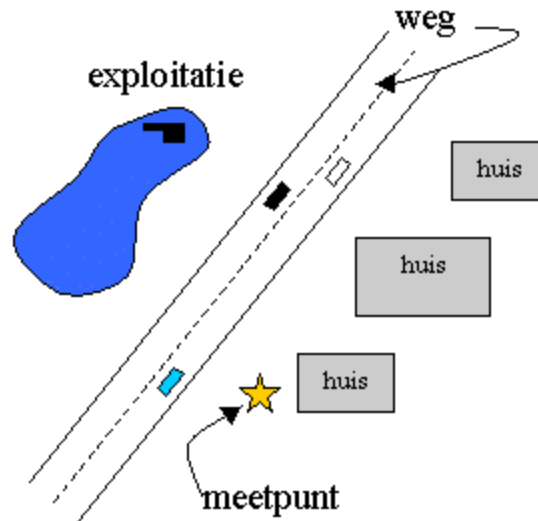
Onderstaande applet toont het geluidverloop ter hoogte van een meetpunt op het moment dat een F16 voorbijvliegt. De eerste knal is een flair die de komst van de F16 aankondigt. Het is duidelijk dat kortstondige luidruchtige events best gekarakteriseerd worden met behulp van statistische niveaus met lage index of eventueel met de L_{Eq} .



2.3.3.3 Meettechnisch

Statistische geluidsniveaus kunnen handig gebruikt worden voor bijvoorbeeld het opmeten van een **constante** bron bij verstoring van frequente geluidspieken (verkeerslawaaï, vliegtuigen).

- Veronderstel dat we het geluid geproduceerd door een bepaalde exploitatie wensen op te meten ter hoogte van het meetpunt gelegen nabij de woningen aangeduid op onderstaande figuur. Tussen het meetpunt en de exploitatie is er een drukke verkeersweg gelegen.



Oplossing:

→ Een eerste mogelijkheid bestaat erin de weg af te sluiten en het geluidsniveau op te meten zonder verkeerslawaaï dat kan interfereren met de metingen. Dit is echter een oplossing die in de meeste gevallen praktisch zeer moeilijk te realiseren is.

→ Indien de geluidsbronnen van het bedrijf waarvan men het geluid wenst op te meten op eenvoudige wijze kunnen aan- en uitgeschakeld worden, kan men het geluid geproduceerd door het bedrijf in kwestie berekenen uit het verschil in geluidsniveau met het bedrijf al dan niet in werking. Om een voldoende nauwkeurige bepaling van het specifieke geluid veroorzaakt door het bedrijf te garanderen moet het achtergrondgeluid meer dan 5 dB lager zijn dan het geluid geproduceerd door de exploitatie. Dit is echter niet steeds het geval, bovendien kunnen vele exploitaties niet zomaar aan- en uitgeschakeld worden.

→ De beste benadering voor het gestelde probleem bestaat erin het geluidsklimaat te karakteriseren over een langere periode (minstens een etmaal) met behulp van statistische geluidsniveaus. Het verkeerslawaaï wordt dan gekarakteriseerd door de L_{A5} , maar zal weinig invloed hebben op de L_{A95} . De L_{A95} zal in de meetomstandigheden waarvan sprake is de meest ideale parameter zijn om de geluidsbron (exploitatie) op te meten.

- Indien men echter bijvoorbeeld het transport van en naar het bedrijf wenst te karakteriseren, kan men handig gebruik maken van de L_{A5} of de L_{A1} .

Afhankelijk van de situatie dient men een relevante parameter te kiezen voor de karakterisatie van het geluid dat men wenst te beschrijven.

2.4 Vectorintensiteitsmetingen

Vectorintensiteit is gedefinieerd als de vector met als richting de richting van de stroom van akoestische energie en als lengte de akoestische energie, die per tijdseenheid door een eenheidsoppervlak passeert. Uit de wetten die het behoud van akoestische energie beschrijven, kan men op eenvoudige wijze afleiden dat de ogenblikkelijke vectorintensiteit in gassen gegeven is door $I(t)=p(t) \cdot v(t)$, waarbij $v(t)$ de ogenblikkelijke deeltjessnelheid ten gevolge van het passeren van de geluidsgolf is. De vectorintensiteit fluctueert dus zo sterk in de tijd als het geluidssignaal zelf. Enkel het tijdsgemiddeld transport van energie is nuttig. Daarom wordt de grootte steeds over de tijd uitgemiddeld tot

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)}$$

© INTEC, Universiteit Gent

2.4.1 Vectorintensiteitsprobe

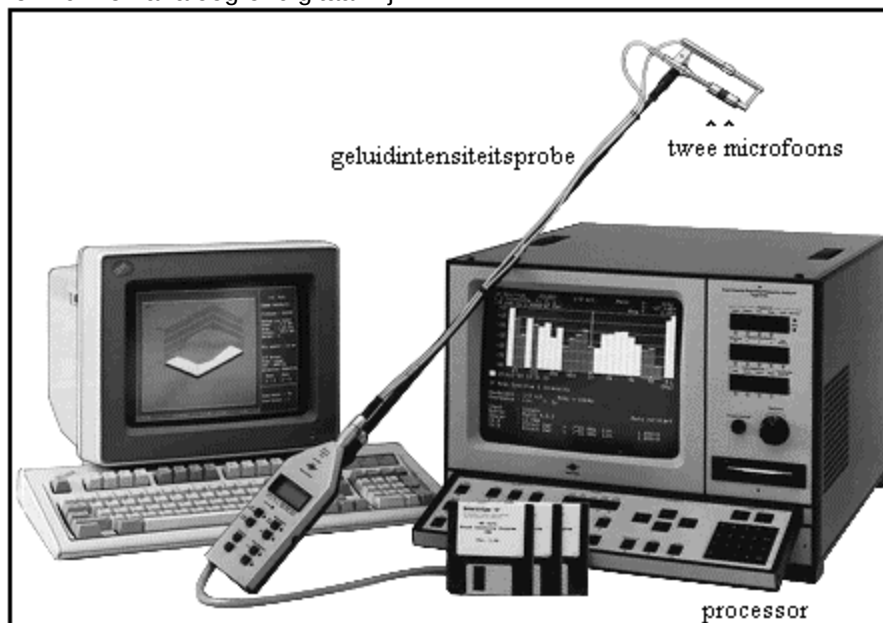
Meting van de geluidintensiteit :

Vaak hoeven we slechts één component van I te meten, volgens een bepaalde richting en zin:

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)}$$

De grootte I van de component van I volgens een bepaalde richting en zin is dus de gemiddelde waarde over een bepaalde tijd van het product van $p(t)$ en de component van $v(t)$ volgens diezelfde richting en zin.

De methodes om de geluidintensiteit te meten zijn meestal gebaseerd op de **twemicrofoongeluidintensiteitsprobe**. De geluidsdruk en de deeltjessnelheid worden hierbij afgeleid van twee microfoons, die de geluidsdruk meten en die een kleine afstand Δr van elkaar verwijderd zijn. Op de figuur hiernaast zie je dat de twee microfoons met hun diafragma naar elkaar zijn gericht, wat de meest gebruikelijke configuratie is. De twemicrofoon geluidintensiteitsprobe, evenals de bijhorende processoren, instrumentatie en kalibratietoestellen zijn internationaal gestandaardiseerd (norm : [IEC 61043 \(1993-11\)](#)). De processoren kunnen analoog of digitaal zijn.



We beschrijven hieronder twee methodes gebaseerd op de twee-microfoongeluidintensiteits-probe. Ze zijn geldig op voorwaarde dat de afstand $\Delta r \ll$ golflengte λ . Met de twee microfoons 1 en 2 worden resp. geluidsdrukken $p_1(t)$ en $p_2(t)$ gemeten. De richting en zin van de component van **I**, die we meten, is bepaald door de rechte waarop de twee microfoons gesitueerd zijn en wel in de positieve zin van microfoon 1 naar microfoon 2 ; de grootte I is bepaald in het middelpunt tussen de twee microfoons.

- **Directe methode :**

We kunnen bewijzen dat in het middelpunt tussen de twee microfoons de volgende benaderingen gelden :

voor de geluidsdruk $p(t)$:

$$p \approx \frac{p_1 + p_2}{2}$$

voor de deeltjessnelheid $v(t)$:

$$v \approx \frac{1}{\rho \Delta r} \int (p_1 - p_2) dt$$

Hieruit volgt voor de grootte I van de gemeten component van **I** :

$$I \approx \frac{1}{2\rho\Delta r} (p_1 + p_2) \int (p_1 - p_2) dt$$

- **Kruisspectrum-(FFT) methode :**

We kunnen bewijzen dat de grootte I van de gemeten component van **I** in functie van de frequentie gegeven wordt door :

$$I(f) = -\frac{1}{2\pi f \rho \Delta r} \text{Im} [G_{12}(f)]$$

Hierin is $G_{12}(f)$ het kruisspectrum van de twee geluidsdrukken $p_1(t)$ en $p_2(t)$.

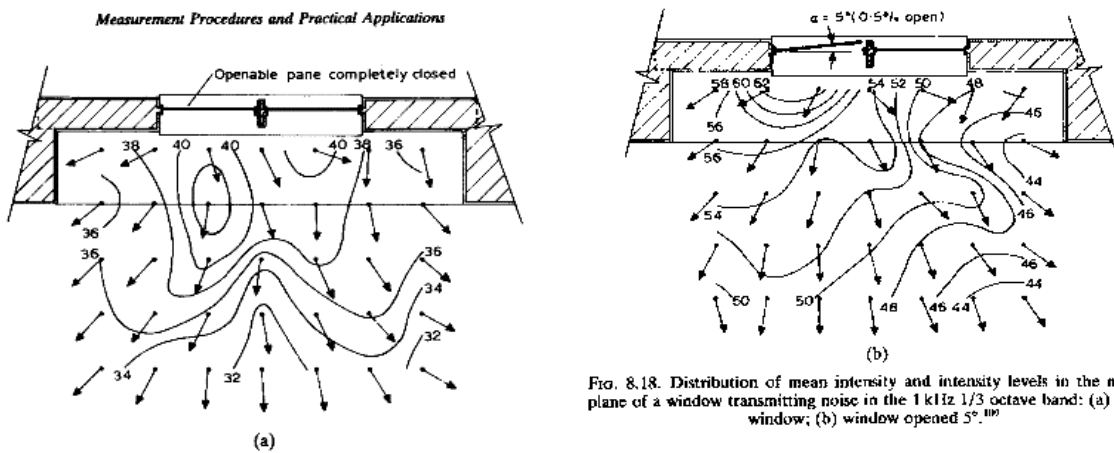
© WERK, Vrije Universiteit Brussel

2.4.2 Toepassingen

Aangezien de vectorintensiteitsmeting niet alleen een grootte van de akoestische energiestroom is, maar er eveneens richting aan geeft, is de methode geschikt om de bron van geluid op te sporen of akoestische lekken in wanden en omkastingen te detecteren.

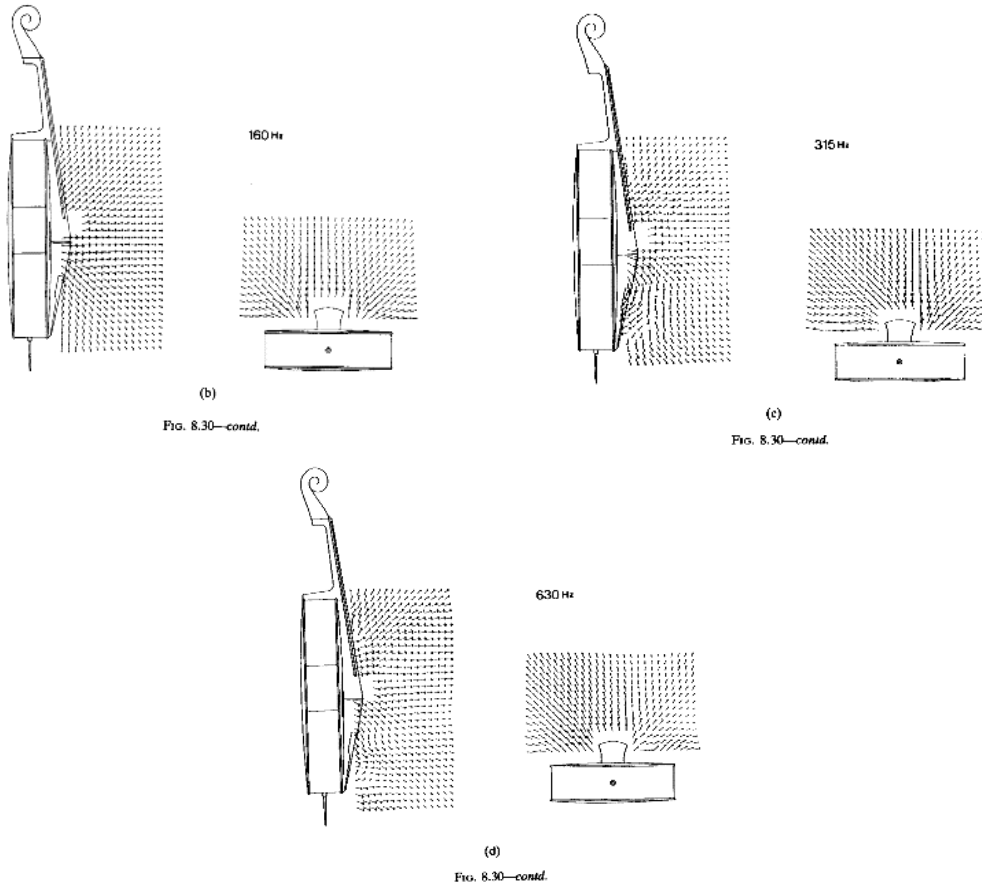
Enkele voorbeelden:

Vectorgeluidintensiteitsmetingen voorgesteld in onderstaande figuur laten toe te zien door welke delen van het raam het grootste gedeelte van de akoestische energie binnenkomt in de ruimte.



Vectorgeluidintensiteit in de buurt van een gesloten en lichtjes geopend raam, metingen in 1kHz 1/3 octaafband (bron: Sound Intensity by F.J. Fahy)

Onderstaande figuur toont de vectorintensiteit in de buurt van een cello bij verschillende frequenties. De plaatsen waar het meeste geluid ontstaan is, zijn duidelijk te zien. Merk evenwel op dat er bij 315 Hz ook een stroom van akoestische energie terug naar het instrument gaat. Dit deel van het geluid is enkel in het nabije veld belangrijk en zal op grotere afstand geen invloed hebben. Wat zou er gebeuren wanneer je het gedeelte van de cello waar energie naar binnen lijkt te stromen verstevigt zodat het niet meer kan meebewegen?

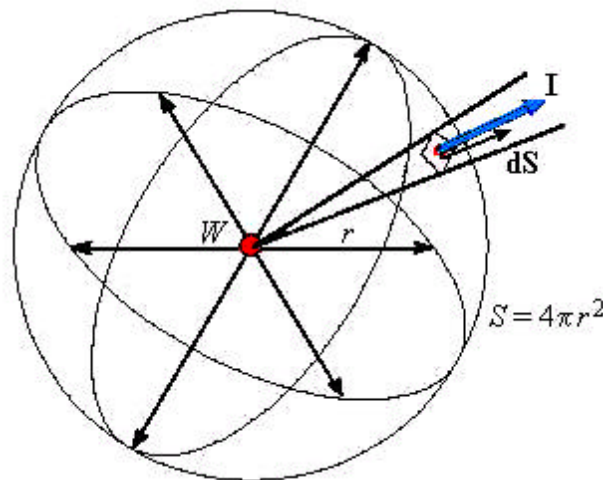


Vectorgeluidintensiteit in de buurt van een cello bij verschillende frequenties (bron: Sound Intensity by F.J. Fahy)

Vectorintensiteitsmetingen kunnen gebruikt worden om het akoestisch vermogen van een geluidsbron te bepalen op de plaats waar de geluidsbron effectief gebruikt wordt. Voor de omgevingsgeluiddeskundige is deze toepassing zeer belangrijk.

© INTEC, Universiteit Gent

2.5 Geluidsvermogenmetingen



Het **geluidsvermogen** (of **bronvermogen**), afgeleverd door een geluidsbron, is :

$$W = \int_S \mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{uitgedrukt in [W]})$$

waar $\mathbf{I}$ de vectoriële **geluidintensiteit** is, uitgedrukt in $[\text{W}/\text{m}^2]$, over het elementair oppervlak $d\mathbf{S}$. Indien I de grootte van de component van $\mathbf{I}$ is, loodrecht op het elementair oppervlak, geldt :

$$W = \int_S I dS$$

Indien I in alle richtingen constant is (**niet-directieve** geluidsbron) geldt : $W = I S$.



Het **geluidsvermogeniveau** wordt als volgt gedefinieerd (norm : [ISO 131-1979](#))

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (\text{re } W_0 = 10^{-12} \text{ W})$$

$$W_0 = I_0 S_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \cdot 1 \text{ m}^2 = 10^{-12} \text{ W}$$

Een geluidsbron wordt gekenmerkt door zijn geluidsvermogen W . Een waarnemingspunt op afstand r van de geluidsbron gelegen, wordt gekenmerkt door de geluidsdruk p of geluidintensiteit I die er heersen. Je moet goed opletten voor misverstanden, aangezien alle in dB worden uitgedrukt.

© WERK, Vrije Universiteit Brussel

2.5.1 Kleine geluidsbronnen

Met kleine geluidsbronnen wordt verwezen naar bronnen waar we op eenvoudige wijze volledig rond en boven kunnen om er geluidmetingen te verrichten. De metingen kunnen bijvoorbeeld uitgevoerd worden om het geluidsvermogen van een reeks toestellen te bepalen zodat dit bij de specificaties opgenomen kan worden. De vermogenmetingen kunnen ook tot doel hebben de bijdrage van individuele toestellen in een bedrijf tot de globale geluidemissie te bepalen om vervolgens door middel van een propagatiemodel de impact op de omgeving te schatten. Merk op dat kleine geluidsbronnen soms verschillende meter hoog en breed kunnen zijn.

© INTEC, Universiteit Gent

2.5.1.1 Op basis van vectorintensiteit

Naast een aantal methodes om het geluidsvermogen te meten op basis van geluidsdrukmetingen, kan het geluidsvermogen ook gemeten worden op basis van geluidintensiteitsmetingen. Vermits de geluidintensiteit $\mathbf{I}$ een vectoriële grootheid is (I is de gemiddelde waarde over de tijd van het product van de geluidsdruk $p(t)$ met de vectoriële deeltjessnelheid $\mathbf{v}(t)$), zijn dergelijke metingen een stuk omslachtiger.

Realisatie

in een vrij geluidveld

- metingen van het geluidsvermogen op basis van geluidintensiteitsmetingen zijn gelijkaardig aan deze op basis van geluidsdrukmetingen, maar de vereisten zijn minder streng wat betreft :
 - meetruimte
 - achtergrondgeluid
 - meetafstand
 - vorm van het meetoppervlak
- in een diffuus geluidveld kunnen de hieronder beschreven methodes niet toegepast worden: in een diffuus geluidveld gaan alle geluidsgolven kriskras door elkaar in elk punt, want geen enkele richting heeft de voorkeur. Er moet een netto geluidenergieflux in een zekere richting doorheen het meetoppervlak gaan.

Types geluid :

alle types, behalve **impulsachtig geluid** (kortstondige, geïsoleerde pieken)

Internationale normen terzake bestaan (normen : [ISO 9614-1:1993](#) en [ISO 9614-2:1996](#)).

Kruisspectrum-(FFT)-methode

We kunnen bewijzen dat de grootte I van de gemeten component van $\mathbf{I}$ in functie van de frequentie gegeven wordt door :

$$I(f) = -\frac{1}{2\pi f \rho \Delta r} \operatorname{Im} \left[G_{12}(f) \right]$$

Hierin is $G_{12}(f)$ het kruisspectrum van de twee geluidsdrukken $p_1(t)$ en $p_2(t)$.

De methodes om het geluidsvermogen te meten, gebaseerd op de twee-microfoongeluidintensiteitsprobe, hebben een aantal kenmerken:

voordelen :

- Vaak moeten we metingen van geluidintensiteit en geluidsvermogen uitvoeren in een omgeving met storend achtergrondgeluid. Een werktuigmachine in een fabriek of een ander groot object kan niet steeds in b.v. een anechoïsche kamer worden geplaatst. De geluidintensiteitsprobe laat toe de geluidssituatie rondom de geluidsbron beter in kaart te brengen, dan mogelijk is met geluidsdrukmetingen. Door te meten in het nabije geluidveld (dichtbij de geluidsbron) is de hinder door het achtergrondgeluid beperkter.
- Het opsporen van lokale geluidsbronnen binnen een complexe geluidsbron wordt mogelijk : zones met een grote geluidintensiteit wijzen op de nabijheid van bronnen. Een interessante toepassing is het opvolgen van productieproblemen : enkel de probleemzones meten, verlaagt de meetkosten.

nadelen :

- complexe en dure meetinstrumentatie
- gevoelig voor faseverschuivingen van de microfoonsignalen
- microfooninterferentie mogelijk

Bepaling van het geluidsvermogen

Het geluidsvermogen wordt dan bepaald, vertrekkende van de definitie

$$W = \int_S \mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} = \int_S I dS$$

waarin I de grootte van de component van $\mathbf{I}$ is, loodrecht op het elementair oppervlak $d\mathbf{S}$

Naar analogie met de metingen van het geluidsvermogen op basis van geluidsdrukmetingen, verdelen we het meetoppervlak S in n gelijke deelloppervlakken S_i , waarmee de n meetpunten zijn betrokken. In elk meetpunt bepalen we I_i met één van de methodes hierboven beschreven. Als benadering voor het geluidsvermogen vinden we dan :

$$W \approx \sum_{i=1}^n I_i S_i$$

© WERK, Vrije Universiteit Brussel

2.5.1.2 In vrijeveld

Een vrijeveldomgeving is een omgeving waarin geen reflecties van geluid optreden. Bovendien veronderstellen we dat er in die omgeving geen andere geluidsbronnen dan degene die we wensen te meten, voorkomen. Op voldoende grote afstand van de bron (het verre veld) weten we dat de akoestische energie in een dergelijke omgeving radiaal van de bron weg stroomt. Met andere woorden, de richting van de intensiteitsvector $\mathbf{I}$ is gekend en moet dus niet meer opgemeten worden. Dit vereenvoudigt de meetprocedure aanzienlijk.

Een grote open ruimte zonder wind of neerslag of te veel zon is een goede benadering voor een vrij veld. Het is echter moeilijk om deze ideale situatie buiten te realiseren. Daarom construeert men anechoïsche of halfanechoïsche ruimtes.

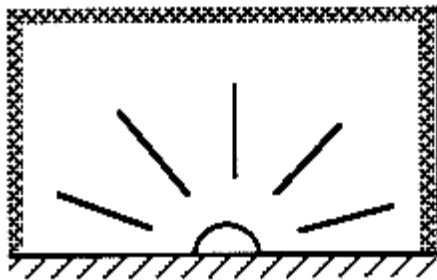
© INTEC, Universiteit Gent

2.5.1.2.1 Halfanechoïsch

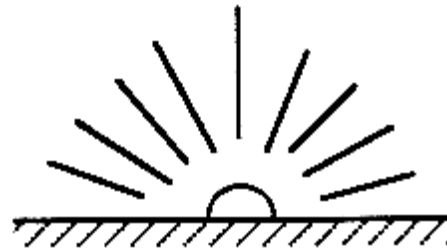
Een **anechoïsche halfruimte** is een ruimte die (doorgaans onderaan) begrensd wordt door een hard oppervlak dat de geluidsgolven reflecteert. Langs de andere zijden is er in principe geen materiële begrenzing, ofwel worden de geluidsgolven volledig geabsorbeerd en dus niet gereflecteerd.

Realisatie :

- binnen in een [anechoïsche kamer](#) (ook wel **akoestisch dode kamer** genoemd) met harde vloer
- buiten op b.v. een hard betonoppervlak



harde vloer

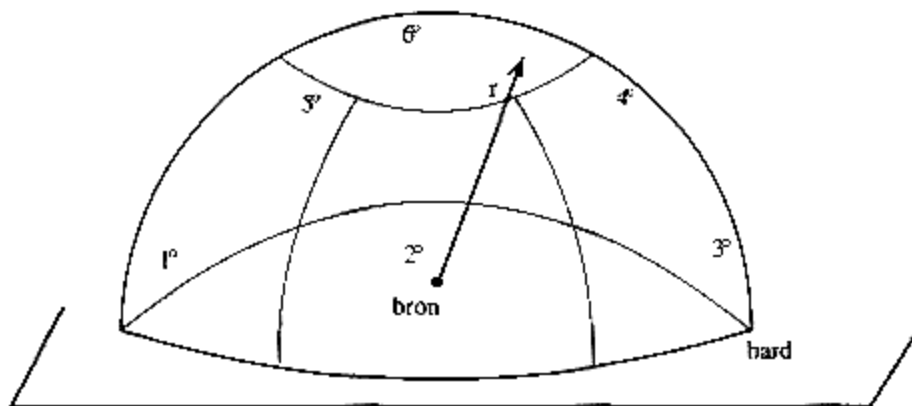


harde vloer buiten

Types geluid :

- alle types, behalve **impulsachtig geluid** (kortstondige, geïsoleerde pieken)

Een internationale norm ter zake bestaat (norm : [ISO 3745-1977](#)).



- De geluidsbron wordt op het hard oppervlak geplaatst.

- De meetpunten, n in aantal, bevinden zich op voldoende afstand van de bron om te waarborgen dat de meting in het vrije, verre geluidveld verricht wordt.
- Verder zijn de n meetpunten zodanig over de halfrimte verdeeld opgesteld (op een half boloppervlak S) dat ieder betrokken is met een gelijk deeloppervlak S_i , dus $nS_i = 2\pi^2$
- De internationale norm geeft de coördinaten van de meetpunten op.

Indien de bron, b.v. een machine, niet isotroop afstraalt, meten de diverse microfoons verschillende geluidsdrukken. Daarom houden we rekening met een **ruimtelijk gemiddelde effectieve geluidsdruk** p_m in de formule voor het geluidsvermogen $W = I 2\pi r^2$, waarin :

$$I = \frac{1}{\rho c} p_m^2$$

We mogen bovenstaande formule gebruiken, want er is een vrij geluidveld boven het hard oppervlak. We gaan nu over op gereduceerde grootheden :

$$\frac{W}{W_0} = \frac{p_0^2}{W_0 \rho c} \frac{p_m^2}{p_0^2} 2\pi r^2 = \frac{p_m^2}{p_0^2} 2\pi r^2$$

want voor normale atmosferische omstandigheden (luchtdruk = 10^5 Pa , temperatuur = 20 °C) geldt dat :

$$\frac{p_0^2}{W_0 \rho c} \approx 1$$

Het geluidsvermoggenniveau (en daaruit eventueel het geluidsvermogen) kan dus bepaald worden met de volgende formule :

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{p_m^2}{p_0^2} + 10 \log r^2 + 10 \log 2\pi$$

$$L_W = L_{p_m} + 20 \log r + 8 \text{ dB} \quad (\text{exact } 7.98)$$

waarin L_{p_m} op de volgende wijze wordt bepaald :

1. de n microfoons meten de geluidsdrukniveaus L_{p_i} (voor de i -de microfoon, $i = 1, 2, \dots, n$)

$$2. \quad \frac{p_i^2}{p_0^2} = 10^{\frac{L_{p_i}}{10}}$$

$$3. \quad p_m^2 = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n p_i^2 S_i \quad \left(= \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{n} \quad \text{als} \quad S_i = \text{constant} \right)$$

$$4. \quad L_{p_m} = 10 \log \frac{p_m^2}{p_0^2}$$

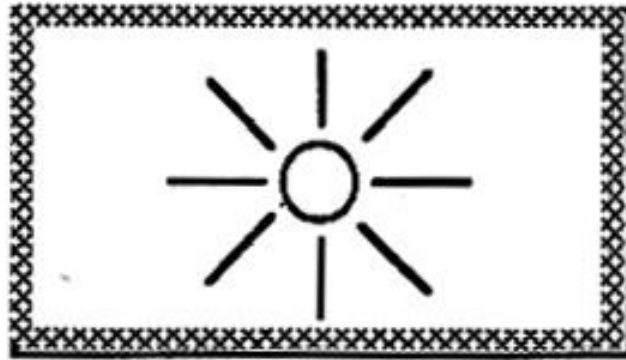
De metingen worden meestal verricht in de genormaliseerde frequentiebanden (1/1 octaafbanden of 1/3 octaafbanden).

2.5.1.2.2 Anechoïsch

De fundamentele metingen van het geluidsvermogen gebeuren in een **volledig anechoïsche ruimte**, waarin de n microfoons zich over een volledig boloppervlak S bevinden rondom de geluidsbron. In dat geval is $nS_i = 4\pi^2$.

Realisatie :

binnen in een [anechoïsche kamer](#) (ook wel **akoestisch dode kamer** genoemd)



akoestisch dode kamer

Types geluid :

- Alle types, behalve **impulsachtig geluid** (kortstondige, geïsoleerde pieken)

Een internationale norm terzake bestaat (norm : [ISO 3745-1977](#)).

Het geluidsvermoggenniveau (en daaruit eventueel het geluidsvermogen) kan dus bepaald worden met de volgende formule :

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = L_{p_m} + 10 \log r^2 + 10 \log 4\pi = L_{p_m} + 20 \log r + 11 \text{ dB}$$

Benadering :

De volgende formule is geldig wanneer de minimum- en maximumwaarden voor L_{pi} niet verder dan 10 dB uit elkaar liggen, bijvoorbeeld te wijten aan **directiviteit** van de geluidsbron :

$$L_{p_m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{p_i} + 1 \text{ dB}$$

2.6 Grote installaties

Voor grote industriële installaties die bestaan uit vele geluidsbronnen (b.v. scheikundige industrie) is het moeilijk om alle bronnetjes afzonderlijk te bepalen. Voornamelijk het meten boven de installatie vormt een probleem. Daarom werden verschillende benaderde meetmethodes uitgewerkt, die gebaseerd zijn op geluidsdruckmetingen in een vlak op geringe hoogte. De Vlaamse administratie raadt de "geluidskaartmethode" aan.

2.6.1 Geluidskaartmethode

De geluidskaartmethode is in wezen een combinatie van de Stubermethode en de Colenbrandermethode. Deze methode wordt vooral gebruikt voor industrieën die zijn opgebouwd uit vele, min of meer los van elkaar staande, open installaties. Bij de geluidskaartmethode wordt de emissie bepaald op basis van geluidsniveaumetingen op de snijpunten van een min of meer regelmatig raster. Hierbij wordt gemeten in een vlak op een vaste afstand van de grond. Het geluidsniveau wordt gemeten op de rasterpunten. Op basis van deze meetresultaten wordt via interpolatie resultaten verkregen op een regelmatig raster met kleinere rasterafstand. Op dit raster worden de punten van gelijk geluidsdruckniveau met elkaar verbonden, wat resulteert in de typische contourenfiguur.

De berekening van het vermogen gebeurt dan door de contour rond de bronnen, te benaderen door een cirkel (die in feite de omtrek is van een geprojecteerde halve bol op het meetvlak). Het gemiddelde geluidsdruckniveau op de beschouwde contour wordt dan als gemiddelde geluidsdruckniveau op deze cirkel genomen. Het vermogen wordt dan uiteindelijk bekomen door een oppervlaktecorrectie toe te passen op het gemiddelde geluidsdruckniveau op de benaderde halve sfeer. Er wordt een correctie voor de luchtabsorptie en voor de bodemabsorptie toegepast.

Voor de geluidskaartmethode wordt de volgende vergelijking gebruikt:

$$L_{WR} = L_p + 10 \log(2S_g + h_0 l) + a_{lu} \cdot r_{gem} + \left(4,8 - \frac{n_B + n_0}{r_{gem}} \left(17 + \frac{300}{r_{gem}} \right) \right)$$

Waarin:

L_{WR} : geluidsvermogeniveau in dB(A)

L_p : gemiddeld geluidsdruckniveau ($L_{Aeq,20s}$) op de contour in dB(A)

S_g : grondoppervlak binnen de contour in m^2

l : omtrek van de in het meetvlak geprojecteerde benaderende halve sfeer in m

a_{lu} : luchtabsorptie in dB/m

r_{gem} : gemiddelde straal van de contour (=de straal van de benaderende sfeer) in m

h_B : bronhoogte in m.

3 Geluidwetgeving

3.1 Omgevingslawaa: Vlarem II

Het is de bedoeling om in deze leereenheid in te gaan op de uitvoering van een volledig akoestisch onderzoek, al dan niet in het kader van een [milieu-effecten-rapport](#) (MER).

Definitie



Volgens Bijlage 4.5.2. van [VLAREM II](#) omvat een volledig akoestisch onderzoek tenminste:



- een beschrijving van de bestaande akoestische situatie op basis van immissieniveaus op enkele representatieve meetplaatsen, gemeten onder representatieve weersomstandigheden die voldoen aan de bepalingen van de artikelen 1, 2, 3 en 4 van de bijlage 4.5.1. van [VLAREM II](#)
- een weergave en bespreking van de meetresultaten en van de meetomstandigheden met vermelding van de heersende windrichting en windsnelheid op het ogenblik van de metingen; de beoordeling van de resultaten gebeurt volgens de bepalingen van artikel 5 van bijlage 4.5.1. van [VLAREM II](#).
- een grondplan met aanduiding van de schaal, waarop de meetpunten zijn aangeduid
- Een verantwoording van de duur van de metingen en van de keuze van de meetpunten en van de meetgrootheden
- een weergave van de door de inrichting veroorzaakte overschrijding van de richtwaarde en/of van de volgens artikel 26 van VLAREM II opgelegde bijzondere grenswaarden.



Een volledig akoestisch onderzoek in het kader van de VLAREM II-wetgeving dient uitgevoerd te worden door een [erkend laboratorium of persoon](#).



© INTEC, Universiteit Gent

3.1.1 Milieu-effectrapportage

Om tegemoet te komen aan de verplichtingen opgelegd door de EEG-richtlijn inzake M.E.R. werd in het Vlaamse Gewest een voorlopige regeling uitgewerkt bij diverse besluiten van de Vlaamse Regering van 23 maart 1989. Voor de industrie is vooral het B.VI.R. van 23 maart 1989, houdende organisatie van de milieu-effectbeoordeling van bepaalde categorieën van hinderlijke inrichtingen, van belang.

Het B.VI.R. onderwerpt 22 categorieën van inrichtingen, met verschillende onderrubrieken, aan een M.E.R.. Het M.E.R. moet opgesteld worden vooraleer de milieuvergunning toegekend kan worden.

De uit te voeren studie omvat:

- a) een beschrijving van het project
- b) eventueel een schets van alternatieven
- c) de belangrijkste milieu-effecten
- d) beschermingsmaatregelen
- e) moeilijkheden bij het opstellen van het rapport
- f) een tewerkstellingsrapport.

De studie moet opgesteld worden door een team bestaande uit bedrijfsinterne en bedrijfsexterne deskundigen. Deze laatsten moeten erkend zijn door de Minister. De samenstelling van het college moet vooraf goedgekeurd zijn door de Cel MER, Planning en Promotie van AMINAL en het opgesteld rapport moet volledig en conform verklaard worden vooraleer het samen met de vergunningsaanvraag ingediend kan worden.

Milieu-effectrapportage

Richtlijn 85/337/EEG van de Raad van 27 juni 1985 betreffende de milieu-effectbeoordeling van bepaalde openbare en particuliere projecten (Pb.L. 1985, nr.175, sindsdien gewijzigd)

Doelstelling

Milieu-effectrapportering vindt zijn oorsprong in de VS. Het beoogt preventief milieubescherming te verwezenlijken door bepaalde projecten die belangrijke gevolgen kunnen hebben voor het milieu aan een milieu-effectbeoordeling te onderwerpen vooraleer een bestuursorgaan zijn toestemming verleent aan het betrokken project.

Toepassingsgebied

De richtlijn betreffende de milieu-effectrapportage is van toepassing op openbare en particuliere projecten die aanzienlijke gevolgen voor het milieu kunnen hebben.

Voornaamste principes

Milieu-effectbeoordeling houdt in dat op passende wijze een identificatie, beschrijving en beoordeling wordt gegeven van de directe en indirecte effecten van een project op mens, dier en plant, bodem, water, lucht, klimaat en landschap, de onderlinge interactie, de materiële goederen en het cultureel erfgoed.

Het rapport omvat:

1. een beschrijving van het project,
2. een schets van de alternatieven die niet in aanmerking komen,
3. de belangrijkste milieu-effecten van het project,
4. de beschermende maatregelen,
5. een niet-technische samenvatting,
6. de technische leemten of ontbrekende kennis.

De verantwoordelijkheid voor het opstellen van het milieu-effectrapport berust bij de initiatiefnemer. De overheid kan wel basisinformatie ter beschikking stellen. De milieu-effectrapportering is een aanvulling en een middel ter coördinatie van vergunningsprocedures. Voordat de vergunning(en) verleend worden moet het M.E.R. ter beschikking gesteld worden aan de milieu-administraties, het publiek en eventueel derde landen. In het kader van de vergunningsprocedure moet rekening gehouden worden met het M.E.R., met de resultaten van de raadplegingen van milieu-administraties en de inspraak van het publiek en, indien van toepassing, de grensoverschrijdende raadpleging van een betrokken derde lidstaat. De beslissing moet worden gemotiveerd en gepubliceerd.

3.1.2 Erkenning deskundigen

Art. 10.

De deskundigen bedoeld in artikel 7, §1, 2° kunnen door de Vlaamse Minister die bevoegd is voor het leefmilieu worden erkend voor een of meerdere van de volgende disciplines:

1. mens;
2. fauna en flora;
3. bodem;
4. water;
5. lucht;
6. licht, warmte en stralingen;
7. geluid en trillingen;
8. klimaat;
9. monumenten en landschappen en materiële goederen in het algemeen.

Art. 11.

§1. De aanvraag tot erkenning als deskundige dient per aangetekend schrijven ingediend te worden bij de Vlaamse Minister bevoegd voor Leefmilieu. In de aanvraag moeten de disciplines waarvoor de aanvrager erkend wenst te worden nader bepaald zijn.

Indien de aanvrager een rechtspersoon is, dienen daarenboven de namen van dienstdoende deskundigen die met de opstelling van de rapporten zullen worden gelast, de statuten van de vennootschap of vereniging evenals de namen van haar zaakvoerders of beheerders medegedeeld te worden.

§2. Vooraleer uitspraak te doen over de in §1 bedoelde erkenningsaanvraag, wint de Vlaamse Minister bevoegd voor Leefmilieu, het advies in van de Cel Mer van de Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer van de diensten van de Vlaamse Regering.

Daarenboven wordt het advies ingewonnen:

- voor erkenningsaanvragen inzake de discipline "mens": van de Administratie voor Gezondheidszorg van de Diensten van de Vlaamse Regering;
- voor erkenningsaanvragen inzake de discipline "fauna en flora": van de Afdeling Natuur van de Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer van de Diensten van de Vlaamse Regering;
- voor erkenningsaanvragen inzake de discipline "monumenten en landschappen en materiële goederen in het algemeen": van de Afdeling Monumenten en Landschappen evenals van de Afdeling Ruimtelijke Ordening van de Administratie Ruimtelijke Ordening, Huisvesting en Monumenten en Landschappen van de Diensten van de Vlaamse Regering.

§3. Met het oog op het onderzoek van de in §1 bedoelde erkenningsaanvraag, is de aanvrager verplicht al de door de Cel Mer van de Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer van de Diensten van de Vlaamse regering gevraagde aanvullende gegevens en/of documenten te verstrekken.

§4. De erkenning als deskundige in één of meer disciplines wordt verleend voor een termijn van maximum vijf jaar. Deze erkenning kan worden verlengd.

§5. De erkenning kan door de Vlaamse Minister ten alle tijde worden ingetrokken wanneer niet meer aan de erkenningsvoorwaarden wordt voldaan.

Art. 12.

Om erkend te worden, moet elke deskundige aan de volgende voorwaarden voldoen:

1. Als het een natuurlijke persoon betreft:

- a) de nationaliteit hebben van een lidstaat van de Europese Unie;
- b) van zijn burgerlijke en politieke rechten genieten;
- c) voldaan hebben aan de militiewetten;
- d) houder zijn van een diploma of getuigschrift van hoger of universitair onderwijs;
- e) een voldoende geachte ervaring en onderlegdheid bezitten in het domein van de beschouwde discipline(s);
- f) niet bezoldigd zijn door het rijk, de gemeenschappen, de gewesten, de provincies, de gemeenten, een vereniging van gemeenten of een daarvan afhankende instelling of bestuur, behalve als lid van het onderwijzend personeel.

2. Als het een rechtspersoon betreft:

- a) een vennootschap of vereniging zijn naar Belgisch recht met zetel in België waarvan de statuten geen enkele bepaling bevatten die strijdig is met onderhavig besluit;
- b) erkende deskundigen in dienst hebben die belast zullen worden met de opstelling van de rapporten.

1a vervangen bij Art. 1 B. VI. R. van 25 januari 1995 (B.S. 28 april 1995).

Art. 13.

Het is de erkende deskundige verboden, zelfs na het beëindigen van zijn functie, feiten kenbaar te maken waarvan hij ten gevolge van zijn opdrachten kennis zou hebben gekregen.

© INTEC, Universiteit Gent

3.1.3 Vlarem II

Het oorspronkelijke VLAREM II, m.n. het Besluit van de Vlaamse Regering van 7 januari 1992 houdende vaststelling van het Vlaamse reglement inzake milieuvoorwaarden voor hinderlijke inrichtingen, werd vernietigd door de Raad van State begin 1995 (R.v.St., nr. 52.260, 16.03.95) en was uitsluitend een uitvoeringsbesluit van het Milieuvergunningsdecreet. Het kon dus alleen voorschriften bevatten voor "ingedeelde inrichtingen" (m.n. vergunnings- of meldingsplichtige inrichtingen vermeld in bijlage I van het VLAREM I).

Het nieuwe VLAREM II is eveneens in hoofdzaak een uitvoeringsbesluit van het Milieuvergunningsdecreet en de hoofdbrok van het besluit betreft milieuvoorwaarden voor ingedeelde inrichtingen. Het is echter niet uitsluitend een uitvoeringsbesluit van het Milieuvergunningsdecreet, maar ook van de andere bestaande kaderwetten en decreten op milieugebied. De werkingssfeer van het VLAREM II werd immers in twee opzichten verruimd:

- 1. door het opnemen van milieukwaliteitsnormen met algemene draagwijdte
- 2. door het vaststellen van milieuvoorwaarden voor niet-ingedeelde inrichtingen

Basisfilosofie van VLAREM

De VLAREM-reglementering met betrekking tot industrielawaai kadert in de doelstelling van de Vlaamse overheid om in Vlaanderen een akoestisch kwalitatieve omgeving te creëren. De omschrijving van de milieukwaliteitsnorm gebeurt met behulp van richtwaarden (RW). In functie van het stedenbouwkundig gebied en het tijdstip van de dag ('s morgens, 's avonds en 's nachts) leggen deze een bovengrens vast voor het niveau van het omgevingsgeluid dat 95 % van de tijd mag overschreden worden.

Om deze doelstelling te bereiken worden in de VLAREM-reglementeringen criteria opgelegd. Om diverse redenen is het niet zo eenvoudig te stellen dat het geluid, specifiek veroorzaakt door een bedrijf, kleiner moet zijn dan een bepaalde richtwaarde.

- Ten eerste dient de reglementering rekening te houden met een cumulatie-effect. Als twee naast elkaar gelegen fabrieken elk afzonderlijk minder lawaai produceren(vb. 44 dB(A)) dan de richtwaarde(vb. 45 dB(A)) in een meetpunt, dan kan het resultaat van beide samen (zijnde 47 dB(A)) en het overige omgevingsgeluid toch het geluidsniveau boven de richtwaarde RW doen uitstijgen.
- Een tweede reden ligt in de wens van de overheid om voor bepaalde stedenbouwkundige gebieden, waar het stiller is dan de milieukwaliteitsdoelstellingen = RW, de geluidsniveaus niet te laten toenemen met de komst van een nieuw bedrijf. Voor een dergelijke situatie achtte men het opportuun om de kwaliteitsdoelstelling uitgedrukt door de richtwaarde te vervangen door een nieuwe waarde, nl. het oorspronkelijke omgevingsgeluid L_{A95} .

Tenslotte wenste men rekening te houden met bestaande bedrijven. Daar is het uiteraard moeilijker om aan strenge akoestische eisen te voldoen dan wanneer die vooraf in het ontwerp kunnen ingecalculeerd worden. De prestatie-eisen ten aanzien van lawaaihinder zijn dan ook veel strenger voor bedrijven die als "nieuw" worden beschouwd of die een "aanzienlijke verandering" hebben ondergaan dan voor de zogenaamde "bestaande bedrijven".

"Nieuw" dient men echter niet in de strikte zin te verstaan: ook bedrijven waarbij de exploitatievergunning reeds een tijd verlopen is, of die zelfs nooit een vergunning hebben aangevraagd, maar die duidelijk reeds jaren bestaan, worden toch door de overheid als 'NIEUW' beschouwd. Het verschil in prestatie-eisen kan oplopen tot 10 dB(A) en meer.



Inhoudstafel Vlarem 2: bij het volgen van deze link komt u bij de Vlaamse Navigator Milieuwetgeving, waar u de VLAREM 2 wetteksten kunt consulteren.



Inhoudstafel Vlarem 2-Bijlagen: bij het volgen van deze link komt u bij de Vlaamse Navigator Milieuwetgeving, waar u de VLAREM 2-bijlagen kunt consulteren.

GEBIED	RICHTWAARDEN IN dB(A) IN OPEN LUCHT		
	OVERDAG	'S AVONDS	'S NACHTS
1° Landelijke gebieden en gebieden voor verblijfsrecreatie.	40	35	30
2° Gebieden of delen van gebieden op minder dan 500 m gelegen van industriegebieden niet vermeld sub 3° of van gebieden voor gemeenschapsvoorzieningen en openbare nutsvoorzieningen	50	45	45
3° Gebieden of delen van gebieden op minder dan 500 m gelegen van gebieden voor ambachtelijke bedrijven en kleine en middelgrote ondernemingen, van dienstverleningsgebieden of van ontginningsgebieden tijdens de ontginning	50	45	40
4° Woongebieden	45	40	35
5° Industriegebieden, dienstverleningsgebieden, gebieden voor gemeenschapsvoorzieningen en openbare nutsvoorzieningen en ontginningsgebieden tijdens de ontginning	60	55	55
6° Recreatiegebieden, uitgezonderd gebieden voor verblijfsrecreatie	50	45	40
7° Alle andere gebieden, uitgezonderd: bufferzones, militaire domeinen en deze waarvoor in bijzondere besluiten richtwaarden worden vastgelegd	45	40	35
8° Bufferzones	55	50	50
9° Gebieden of delen van gebieden op minder dan 500 m gelegen van voor grindwinning bestemde ontginningsgebieden tijdens de ontginning	55	50	45
Opmerking: Als eenzelfde gebied valt onder twee of meer punten van de tabel dan is in dat gebied de hoogste richtwaarde van toepassing.			

© INTEC, Universiteit Gent

3.2 Arbeidsveiligheid: EEG-richtlijn 86/188/EEC

Voor een gelijkmatig geluid werd een goede overeenkomst vastgesteld tussen het risico tot gehoorverlies en het A-gewogen geluidsniveau. In een eerste fase van een lawaaionderzoek kan men dan ook de mogelijke probleemplaatsen opsporen aan de hand van eenvoudige metingen met een geluidsniveaumeter. In een later stadium, als lawaaionderdrukingsprogramma's worden overwogen en opgesteld worden, zullen frequentiemetingen nodig zijn.

In de meeste normen in verband met gehoorbeschadigingsrisico's worden piekgeluidsniveaus vermeld die in de werkplaats nooit overschreden mogen worden.

Een even belangrijk, zoniet belangrijker concept is de beperking van de totale geluidsdosis. De geluidsdosis brengt zowel het schommelend geluidsniveau als zijn duur in rekening. De maximum dosis is het A-gewogen equivalent geluidsniveau, L_{eq} , waaraan een werknemer gedurende 40 uur per week of 8 uur per dag kan blootgesteld zijn vooraleer hij een noemenswaardig gehoorverliesrisico loopt. Het spreekt vanzelf dat het steeds om gemiddelden over een bevolking gaat en dat individuen meer of minder gevoelig kunnen zijn voor gehoorverlies. Het voordeel van deze limiet is dat het eventueel overschrijden gedurende een korte periode kan, als daarop maar een voldoende lange periode in een rustiger omgeving doorgebracht wordt. In de meeste landen ligt deze grenswaarde vastgelegd tussen 85 en 95 dBA.

Een recente Europese richtlijn (86/188/EEC) stelt als maximale geluidsdosis over een normale werkdag 85dBA, terwijl voor het ongewogen piekniveau L_{peak} maximaal 140dB toegelaten wordt. De richtlijn is echter gradueel opgevat. Afhankelijk van het vastgestelde geluidsniveau moeten werkgever en werknemer bepaalde voorzorgen nemen. Onderstaande tabel vat de richtlijn samen.

Action required	if $L_{EX,8h}$ if L_{peak}	< 85 dB(A)	≥ 85 dB(A) ≥ 140 dB	≥ 90 dB(A) ≥ 140 dB
The employer must care for (1):				
Noise assessment or measurements, recording and preservation of the data		yes	yes	yes
Access to these data by workers or their representatives and the doctors		yes	yes	yes
Adequate information of workers concerning risks of noise exposure, measures in accordance with the Directive		no	yes	yes
Restriction of access to noise zones		no	no	yes
Reduction of risk to the lowest level reasonably practicable		yes	yes	yes
Binding noise reduction program informing the workers about this		no	no	yes
Reduction of risk of accident caused by the use of hearing protectors		no	yes	yes
Noise exposure declaration/information for new tools and machines		no	yes	yes
Making personal hearing protectors available		no	yes	yes
Requirements for the workers (1):				
Mandatory use of hearing protectors		no	no	yes
Right to have the hearing capacity checked under responsibility of a doctor including the indication on protective and preventive measures		no	yes	yes
Requirements for new machines (2)				
Declaration of L_{Aeq} at workstation		≥ 70 dB(A)		
Declaration that L_{Aeq} at workstation is below 70 dB(A)		< 70 dB(A)		
Declaration of L_{Cpeak}		if above 130 dB		

4 Geluidspropagatie in open lucht



situatieschets: De industriezone van een bepaalde stad raakt helemaal volgebouwd en moet uitgebreid worden. Er zijn verschillende voorstellen uit de bus gekomen om een nieuwe industriezone in te planten of een oude uit te breiden.

Om een verantwoorde keuze te kunnen maken, willen de verantwoordelijken zicht krijgen op de effecten en de eventuele geluidhinder daarvan op de woonzones in de buurt.



Om de geluidspropagatie buiten te voorspellen kan je alles fysisch zo exact mogelijk berekenen. Dit geeft echter al snel aanleiding tot problemen, die noch analytisch noch numeriek op te lossen zijn. Bovendien is het onmogelijk om elk boompje, struikje en tuinhuisje over een zone van b.v. 1 km² exact in rekening te brengen. Benaderingen zijn dus noodzakelijk. Bij het gebruik van benaderingen is het wel noodzakelijk dat iedereen dezelfde benaderingen gebruikt. Daarom werd de norm [ISO 9613-2](#) opgesteld. ISO 9613-2 bepaalt een methode om de attenuatie van geluidspropagatie buiten te berekenen, met de bedoeling de geluidimmissie afkomstig van verschillende types geluidsbronnen te voorspellen op relatief grote afstand.

© INTEC, Universiteit Gent

4.1 ISO 9613

4.1.1 Toepasbaarheid

Zoals gezegd wordt in ISO 9613-2 een methode vastgelegd om een idee te krijgen van de attenuatie van geluidspropagatie buiten, en zo de graad van geluidsoverlast van verschillende bronnen op een afstand te kunnen voorspellen.

ISO 9613-2 probeert het equivalent continu A-gewogen geluidsdrukkniveau $L_{Aeq,T}$ (zoals beschreven in [ISO 1996-1,-2, en -3](#)) te voorspellen, gegeven dat de weersomstandigheden gunstig zijn voor de propagatie van het geluid en dat de geluidssterkte van de bron gekend is. In het vervolg omschrijven we gunstige weersomstandigheden voor de propagatie van het geluid als "belastende situatie".



De methode van ISO 9613-2 steunt expliciet op octaafbandalgoritmes met nominale middenbandfrequentie van 63Hz tot 8kHz om de attenuatie van geluid voortgebracht door een puntbron of een groep puntbronnen. De bron (of bronnen) mag stationair zijn of bewegen, op voorwaarde dat de snelheid niet groot genoeg is om significante Dopplereffecten te introduceren.

toepasbaarheid van ISO 9613-2



ISO 9613-2 is toepasbaar voor de meeste situaties met spoor- en wegverkeer, industriële geluidsbronnen.



ISO 9613-2 kan echter *niet* gebruikt worden voor luchtverkeer, coherente geluidsbronnen of zuivere-toon-geluidsbronnen.

nodige parameters:

1. geometrische eigenschappen van de bron en de omgeving
2. eigenschappen van de grond
3. de sterkte van de bron in termen van octaaf-band geluidsniveaus voor richting relevant voor de propagatie

© INTEC, Universiteit Gent

4.1.2 Normen

In ISO 9613 worden de volgende richtlijnen en normen gebruikt

- ISO 266:1975, Acoustics - Preferred frequencies for measurements
- ISO 1996-1:1982, Acoustics - Description and measurement of environmental noise, Part 1. Basic quantities and procedures
- ISO 1996-2:1987, Acoustics - Description and measurement of environmental noise, Part 2. Acquisition of data pertinent to land use
- ISO 1996-3:198X, Acoustics - Description and measurement of environmental noise, Part 3. Application to noise limits.
- ISO 2204:1979, Acoustics - Guide to international standards on the measurement of airborne acoustical noise and evaluation of its effect on human beings
- ISO 3740:199X, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Guidelines for the use of basic standards and for the preparation of noise test codes.
- ISO 3744:1975, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Engineering methods for free-field conditions over a reflecting plane.
- ISO 8297:199X, Acoustics - Determination of sound power levels of multi-source industrial plants for the evaluation of the sound-pressure levels in the environment - engineering method
- ISO 9613-1:199X, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1. Method of calculation of the absorption of sound by the atmosphere
- IEC 225:1966, Octave, half-octave and third-octave band filters intended for the analysis of sounds and vibrations.
- IEC 651:1979, Sound level meters.
- IEC 804: 1985, Integrating averaging sound level meters.



Meer informatie betreffende ISO normen vind je op <http://www.iso.ch>



Meer informatie betreffende IEC normen vind je op <http://www.iec.ch>

4.1.3 Definities

Voor dit tweede deel van ISO 9613 zijn de volgende definities en deze gegeven in ISO 1996-1 van toepassing.

1. Equivalent continu A-gewogen geluidsniveau bij belastende situatie (in decibels), $L_{Aeq,T}$ (downwind)

de waarde van het A-gewogen geluidsniveau van een continu geluid, dat in een bepaald tijdsinterval T $[t_1, t_2]$, dezelfde geluidenergie zou veroorzaken als het werkelijk gemeten geluidsdruk niveau in het tijdsinterval T.

$$L_{Aeq,T}(belastend) = 10 \log \left(\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right), dB$$

met

- p_0 de referentie geluidsdruk ($20 \text{ mPa} = 20 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)
- $p_A(t)$ het ogenblikkelijke A-gewogen geluidsdruk niveau van het signaal

Dit equivalent continu A-gewogen geluidsniveau bij belastende situatie kan gemeten worden met een integrerend-uitmiddelen geluidsniveaumeter (IEC 804).

Het tijdsinterval moet voldoen aan de voorwaarden gesteld in ISO 1996-2: 5.4.3.3 Het zal lang genoeg zijn om de effecten van verandering van windsnelheid en richting uit te middelen. Praktisch betekent dit dat T varieert tussen 10 minuten en 1 uur.

2. Gemiddeld belastend geluidsdruk niveau (in decibels)

een korte benaming voor $L_{Aeq,T}(\text{belastend})$ zoals gedefinieerd in [1](#).

3. Gemiddeld belastend octaaf-band-geluidsdruk niveau (in decibels), $L_{\text{belastend}}$

een octaaf-band component van $L_{Aeq,T}(\text{belastend})$ (zie [1](#)) zonder A-weging

4. Lange-periode-gemiddeld geluidsdruk niveau (in decibels), $L_{Aeq,LT}$

het equivalent continu A-gewogen geluidsdruk niveau voor een periode T die lang genoeg is om van gemiddelde weersituatie te kunnen spreken, meestal een maand of een jaar.

5. Sommeren van geluidsdruk niveaus

Verschillende bijdragen L_i aan het totale geluidsdruk niveau worden als volgt opgeteld:

$$L = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

6. Insertieverlies van een scherm

het verschil tussen de geluidsdruk niveaus gemeten ter hoogte van de ontvanger op een bepaalde positie onder twee omstandigheden:

1. met het scherm aanwezig
2. met het scherm verwijderd

en verder geen significante wijzigingen.

7. Definities van de geometrische grootheden gebruikt in deze standaard

- d afstand van bron tot de ontvanger (in meter) ([zie figuur 3](#))
- d_p afstand van bron tot de ontvanger geprojecteerd op het grondvlak (in meter) ([zie figuur 3](#) en [figuur 3](#))
- h_b hoogte van de bron (in meter) ([zie figuur 1](#))
- h_o hoogte van de ontvanger (in meter) ([zie figuur 1](#))
- h_m gemiddelde hoogte van het pad van de propagatie boven de grond (in meter) ([zie figuur 3](#))
- $d_{b,h}$ afstand tussen bron en het reflectiepunt op een reflecterende hindernis (in meter) ([zie figuur 4](#))
- $d_{h,o}$ afstand tussen het reflectiepunt op een reflecterende hindernis en de ontvanger (in meter) ([zie figuur 4](#))
- a_r de grootte van het reflecterend oppervlak (in meter²) ([zie figuur 4](#))
- d_{ss} afstand van de bron tot de (eerste) diffractierand (in meter) ([zie figuur 7](#), [figuur 8](#))
- d_{sr} afstand van de (tweede) diffractierand tot de ontvanger (in meter) ([zie figuur 7](#), [figuur 8](#))
- e afstand tussen de eerste en tweede diffractierand ([zie figuur 8](#))

© INTEC, Universiteit Gent

4.1.4 Beschrijving van de bron

Om de attenuatie van geluid bij propagatie buitenshuis te bepalen, worden in ISO 9613 de formules om de attenuatie van geluid voortgebracht door puntbronnen, gebruikt. Dus geluidsbronnen als weg- en spoorverkeer, industriële sites zullen we voorstellen door een aantal cellen, die elk een zeker geluidsniveau en zekere directiviteit hebben. Daarbij hanteren we de volgende afspraken:

- de attenuatie berekend voor het geluid voortgebracht door een representatief punt binnen een cel is representatief voor de attenuatie van het geluid voortgebracht door de volledige cel.
- een lijnbron mag verdeeld worden in kleinere lijnbronnen
- een gebied mag verdeeld worden in verschillende kleinere gebieden (cellen).

Een groep van puntbronnen mag beschreven worden door een equivalente puntbron in het midden van de groep als de puntbronnen



- ongeveer dezelfde sterkte en dezelfde hoogte boven het grondvlak hebben
- dezelfde propagatiecondities naar het punt van ontvangst hebben
- de afstand d van de equivalente puntbron tot de ontvanger minstens twee keer groter is dan de grootste diameter D van het gebied waar de groep puntbronnen gesitueerd is. ($d > 2D$)

Als echter $d < 2D$ of als de propagatiecondities niet voor alle puntbronnen dezelfde zijn (b.v.: door schermen), dan moet de resulterende geluidsbron verdeeld worden in de component puntbronnen.

© INTEC, Universiteit Gent

4.1.5 Basisvergelijkingen

Het gemiddeld belastend geluidsdrukkniveau $L_{\text{belastend}}$ bij de ontvanger (in decibel re $20 \cdot 10^{-5}$ Pa) wordt voor elke puntbron en voor elke octaafband berekend (zoals gespecificeerd in IEC 225) met nominale middenbandfrequenties van 63 Hz tot 8kHz, met de vergelijking



$$L_{\text{belastend}} = L_{\text{WD}} - D \quad (1)$$

Waarbij

- L_{WD} het effectieve octaafband geluidsdrukkniveau is (zonder verdere frequentieweging) in de richting van de propagatie (in decibels re 1 picowatt)
- D de octaafbandattenuatie is gedurende de propagatie van de puntbron naar de ontvanger (in decibel) en als volgt berekend wordt:

$$D = D_{\text{div}} + D_{\text{atm}} + D_{\text{grond}} + D_{\text{refl}} + D_{\text{scherm}} + D_{\text{varia}} \quad (2)$$

- D_{div} is de attenuatie te wijten aan [geometrische divergentie](#)
- D_{atm} is de attenuatie te wijten aan [luchtabSORPTIE](#)
- D_{grond} is de attenuatie te wijten aan [grondeffecten](#)
- D_{refl} is de attenuatie te wijten aan [reflectie](#) door obstakels
- D_{scherm} is de attenuatie te wijten aan [schermen](#)
- D_{varia} is de attenuatie te wijten aan alle [overige effecten](#)



De octaafbandniveaus worden A-gewogen en energetisch opgeteld tot een globaal A-gewogen geluidsdrukkniveau



Het is zeer belangrijk dat je de methode voor het berekenen van een globaal A-gewogen geluidsdrukkniveau uit octaafbandwaarden goed in de vingers hebt.

Het lange-periode-gemiddeld geluidsdrukkniveau, $L_{\text{Aeq,LT}}$ wordt gegeven door

$$L_{\text{Aeq,LT}} = L_{\text{Aeq(belastend)}} - C_{\text{meteo}} \quad (3)$$

waarbij C_{meteo} staat voor de meteorologische correctie.

© INTEC, Universiteit Gent

4.1.5.1 Geometrische divergentie

De geometrische divergentie van een puntbron in het vrije veld is sferisch en wordt bijgevolg gegeven door

$$A_{\text{div}} = 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \text{ dB}$$

met

- d: de afstand van de bron naar de ontvanger in meter
- d_0 : de referentie afstand in meter

4.1.5.2 Atmosferische absorptie

De attenuatie door atmosferische absorptie, A_{atm} (in decibels), tijdens propagatie over een afstand d (in meter), wordt gegeven door de formule

$$A_{\text{atm}} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (6)$$

waarbij α de atmosferische attenuatiecoëfficiënt (in dB/km) is. De waarden voor α zijn opgenomen in [tabel 1](#), waarden die daar niet in opgenomen zijn, zijn terug te vinden in ISO 9613-1 of kunnen met onderstaande javascript berekend worden.

Luchtdruk in Pa (typisch 101325)	Lucht temperatuur in graden Celsius	Relatieve vochtigheid in %	Frequentie in Hz

attenuatie = dB per km

Opmerkingen

- De atmosferische attenuatiecoëfficiënt is sterk afhankelijk van de frequentie van het geluid, de temperatuur en relatieve vochtigheid van de lucht, maar slechts weinig afhankelijk van de luchtdruk.
- Voor schattingen van de mate van geluidhinder moet een gemiddelde atmosferische attenuatiecoëfficiënt gebruikt worden die gebaseerd is op waarden die typisch zijn voor de gemiddelde weersituatie ter plekke.

4.1.5.3 Bodemeffecten

De grondattenuatie, D_{grond} , is hoofdzakelijk het resultaat van de interferentie tussen het geluid dat propageert tussen bron en ontvanger en tussen het geluid dat door de grond gereflecteerd wordt. Deze attenuatie wordt voornamelijk bepaald door de eigenschappen van de grond in de buurt van bron en ontvanger. We gaan er hier van uit dat het grondoppervlak tussen bron en ontvanger betrekkelijk vlak is, al dan niet horizontaal of met een constante helling.

We onderscheiden drie gebieden voor de grondattenuatie: ([zie figuur 1](#))

1. **Het brongebied**, dit strekt zich uit van de bron naar de ontvanger over een afstand van 30 keer de "bron-hoogte" en wordt begrensd door d_b . (h_s is de hoogte van de bron in meter, d_b is de afstand van bron tot de ontvanger geprojecteerd op het grondvlak.)
2. **Het ontvangstgebied**, dit strekt zich uit van de ontvanger naar de bron over een afstand van 30 keer de "ontvanger-hoogte" en wordt eveneens begrensd door d_p (h_r is de hoogte van de ontvanger in meter)
3. **Het middengebied**, het gebied tussen bron- en ontvangstgebied. Als $d_p \leq (30 h_s + 30 h_r)$ dan is er geen middengebied.

Grondabsorptie

De akoestische eigenschappen van de grond worden aangeduid met een factor G , de grondabsorptie. Naargelang de waarde van die grondabsorptie onderscheiden we drie soorten grond:

1. **Harde grond**: bestrating, water, ijs, beton en alle andere grondoppervlakken die weinig poreus zijn. Aangestampte grond (wat vaak voorkomt op een industriële site) kan als harde grond beschouwd worden. Voor harde grond geldt: **$G = 0$**
2. **Poreuze grond**: grond begroeid met gras, bomen en andere vegetatie en verder alle grondoppervlakke waarop vegetatie kan groeien, b.v.: akkerland. Voor poreuze grond geldt: **$G = 1$**
3. **Gemengde grond**: als het oppervlak bestaat uit een mengsel van harde en poreuze grond neemt G waarden aan tussen 0 en 1, waarbij G de waarde is van de poreuze fractie.

Om de grondattenuatie voor een specifieke octaafband te berekenen, moeten we de volgende componenten van de attenuatie berekenen:

- D_b voor het brongebied, bepaald door de grondfactor voor het brongebied G_b
- D_o voor het ontvangstgebied bepaald door de grondfactor voor het ontvangstgebied G_o
- D_m voor het middengebied bepaald door de grondfactor voor dat gebied G_m

Daarvoor gebruiken we de uitdrukkingen uit [tabel 2](#). (of de functies a' , b' , c' en d' in tabel 2)
De totale grondattenuatie voor die octaafband verkrijgen we dan door de formule



$$D_{\text{bodem}} = D_b + D_o + D_m \quad (7)$$

Opmerking:

in gebieden met gebouwen kan de invloed van de bodem op de geluidpropagatie veranderen.

© INTEC, Universiteit Gent

4.1.5.4 Reflectie

De reflectie die we hier beschouwen is die veroorzaakt door min of meer verticale oppervlakken, zoals gevels van gebouwen, die het geluidsdrukniveau bij de ontvanger doen toenemen. Grondreflectie wordt hier niet meegerekend omdat die al in D_{grond} inbegrepen is. Ook de reflectie van nabije verticale oppervlakken, bedoeld om het geluidsdrukniveau bij de ontvanger te verminderen, worden niet meegerekend omdat die in D_{scherm} al beschouwd worden.



De reflecties door een hindernis worden berekend voor alle octaafbanden. Voor de hindernis moeten volgende voorwaarden voldaan zijn:

- er kan een speculaire reflectie geconstrueerd worden zoals in [figuur 4](#)
- de magnetude van de intensiteitsreflectie coëfficiënt voor het oppervlak van de hindernis is groter dan 0,2
- het oppervlak is groot genoeg zodat voor de nominale middenband frequentie f_c (in hertz) van de beschouwde octaafband de volgende relatie geldt

$$f_c > \left(\frac{2c}{a_r \cos \beta} \right) \left(\frac{d_{b,h} \cdot d_{h,o}}{d_{b,h} + d_{h,o}} \right) \quad (9)$$

Waarbij

- c de geluidssnelheid in de lucht is (in m/s)
- $d_{b,h}$ de afstand tussen de bron en het reflectiepunt op het obstakel (in m)
- $d_{h,o}$ de afstand tussen het reflectiepunt en de ontvanger (in m)
- β de incidentiehoek
- a_r de oppervlakte van het reflecterend oppervlak (in m²) ([figuur 4](#))

Als één van deze voorwaarden niet vervuld is voor een bepaalde octaafband, dan is $D_{\text{refl}} = 0$ voor die octaafband.

We onderscheiden twee gevallen:

1. de transmissiecondities voor de echte en de spiegelgeluidsbron zijn dezelfde. In dit geval wordt D_{refl} (in decibels) bepaald door de formule

$$D_{\text{refl}} = -10 \log(1 + \rho) \quad (10)$$

waarbij de intensiteitsreflectiecoëfficiënt is van het oppervlak. Als er geen specifieke data voor de intensiteitsreflectiecoëfficiënt beschikbaar zijn, mag de waarde geschat worden, gebruik makend van [tabel 3](#).

2. de transmissiecondities voor de echte en de spiegelbron zijn significant verschillend. Dan wordt de spiegelbron in rekening gebracht naast de echte geluidsbron. Beiden worden apart beschouwd. Voor beide bronnen is $D_{\text{efl}} = 0$. Het geluidsdrukniveau $L_{\text{WR,spiegelbron}}$ wordt berekend met de formule

$$L_{\text{WR,spiegelbron}} = L_{\text{WR}} + 10 \log(\rho) \quad (11)$$

Voor de spiegelbron worden de attenuatietermen, zowel als ρ bepaald volgens het propagatiepad van het gereflecteerde geluid. De spiegelbron mag verwaarloosd worden als het geluidsdrukniveau ervan ter hoogte van de ontvanger meer dan 7 dB minder is dan dat van de echte bron.

© INTEC, Universiteit Gent

4.1.5.5 Schermen

Een object wordt in rekening gebracht als een afschermdende hindernis (vaak een barrière genoemd) als het aan de volgende eisen voldoet:

- de oppervlakedichtheid is minstens kg/m^2
- het object heeft een gesloten oppervlak zonder grote spleten of gaten
- de horizontale projectie op de loodlijn van de verbindinglijn tussen bron en ontvanger groter is dan de golflengte, m.a.w.: $(l_l + l_r > \lambda)$ [zie figuur 5](#)
- het object is hoog genoeg om de gezichtslijn van de bron naar de ontvanger te blokkeren.

Elk object dat aan deze criteria voldoet wordt voorgesteld door een scherm met verticale randen. De bovenste rand van het scherm is een (hellende) rechte lijn. D_{scherm} wordt gegeven door het verlies van insertie. De diffractie over de bovenrand of rond een verticale rand van een scherm kunnen beide invloed hebben. [zie figuur 6](#) Voor de belastende situatie wordt het effect van de diffractie (in decibel) gegeven door:

diffractie over de bovenrand

$$D_{\text{scherm}} = D_z - D_{\text{grond}} > 0 \quad (12)$$



diffractie rond een verticale rand

$$D_{\text{scherm}} = D_z \quad (13)$$

daarbij is

D_z de schermindex voor elke octaafband (zie vgl. 14)

D_{grond} is de grondattenuatie bij afwezigheid van het scherm.

Opmerking

Als D_{scherm} zoals in (12) gesubstitueerd wordt in de vergelijking

$$D = D_{\text{div}} + D_{\text{atm}} + D_{\text{grond}} + D_{\text{refl}} + D_{\text{scherm}} + D_{\text{varia}}$$

heffen de twee termen D_{grond} elkaar op. De term in D_z in (12) duidt dan op het effect van de grond bij aanwezigheid van een scherm.

De schermindex D_z (in decibels) wordt berekend met de formule

$$D_z = 10 \log \left(3 + \left(\frac{C_2}{\lambda} \right) C_3 z K_w \right) \text{ dB} \quad (14)$$

waarbij

- $C_2 = 20$, daarin zijn de effecten van de grondreflectie begrepen. (Als de grondreflectie apart in rekening gebracht wordt bij de spiegelbron, dan moet $C_2 = 40$ gebruikt worden)
- $C_3 = 1$, voor enkele diffractie ([zie figuur 7](#))
- λ is de golflengte van het geluid bij een nominale middenbandfrequentie (in m)
- z is het verschil in padlengte van het directe en het gediffracteerde geluid en wordt (voor enkele diffractie) berekend met behulp van de vergelijking

$$z = d_{b,h} + d_{b,o} - d$$

- De correctiefactor K_w voor de meteorologische condities wordt berekend met de volgende formule

$$K_w = \exp \left(- \frac{1}{2000} \sqrt{\frac{d_{b,h} d_{b,o} d}{2z}} \right) \text{ als } z > 0$$



$$K_w = 1 \text{ als } z = 0$$

voor laterale diffractie rond hindernissen nemen we $K_w = 1$ ([zie figuur 6](#))

Opmerkingen

1. als de afstand bron-ontvanger kleiner is dan 100m, mag bij het uitrekenen van vgl. 14 $K_w = 1$ genomen worden.

2. de effectiviteit kan soms kleiner zijn dan berekend met de voorgaande vergelijkingen als gevolg van reflecties door andere oppervlakken in de buurt van het propagatiepad van de bron naar de ontvanger.



De schermindex D_z mag niet groter genomen worden dan 20 dB in het geval van enkele diffractie (d.i. dunne schermen) en 25 dB bij dubbele diffractie (d.i. dikke of verschillende schermen)



© INTEC, Universiteit Gent

4.1.5.6 Meteorologische correctie

Het gebruik van vgl. 1 leidt direct tot een gemiddeld geluidsdrukkniveau $L_{Aeq,T(belastend)}$ bij de ontvanger in het geval van de [belastende](#) situatie. Vaak is er echter een lange-periode-gemiddeld geluidsdrukkniveau (in decibels), $L_{Aeq,LT}$ nodig, waarbij T verschillende maanden of zelfs een jaar bedraagt. In zo'n lange periode zitten normaal verschillende weersituaties, die gunstig of ongunstig kunnen zijn voor de geluidpropagatie van de bron naar de ontvanger. In dit geval kunnen we volgens vgl. 3 een waarde voor $L_{Aeq,LT}$ afleiden uit $L_{Aeq,T(belastend)}$ berekend uit vgl. 1 en uit de meteorologische correctie C_{meteo} . Deze berekenen we als volgt:

$$C_{meteo} = 0 \text{ als } d_p \leq 10(h_b + h_o)$$

$$C_{meteo} = C_0 \cdot \left(1 - \frac{10(h_b + h_o)}{d_p} \right) \text{ als } d_p > 10(h_b + h_o)$$

met

- h_s : de hoogte van de bron (in m)
- h_r : de hoogte van de ontvanger (in m)
- d_p : de afstand van bron tot de ontvanger geprojecteerd op het grondvlak (in m)
- C_0 : een constante afhankelijk van de meteorologische gegevens voor de windsnelheid, windrichting en temperatuurgradiënten.



$$C_0 = 10 \left| \log(\text{de fractie van het jaar dat de situatie belastend is}) \right|$$

De effecten van de meteorologische correctie zijn eerder klein voor kleine waarden van d_p , ook voor grote afstanden als de bronhoogte en de hoogte van de ontvanger betrekkelijk groot zijn.

De ervaring leert dat de waarden van C_0 in de praktijk variëren tussen 0 en ongeveer 5 dB. Om C_0 op ± 1 dB te bepalen zijn slechts zeer elementaire gegevens van de lokale meteorologische toestand nodig.

© INTEC, Universiteit Gent

4.1.5.7 Overige types attenuatie

De term D_{varia} in vgl. 2 duidt op de bijdragen aan de attenuatie door allerlei effecten die niet begrepen zijn in de algemene methodes die we tot hier toe besproken hebben. Het zijn de bijdragen van

- $D_{\text{vegetatie}}$, de attenuatie van het geluid tijdens propagatie door vegetatie
- D_{site} , de attenuatie van het geluid tijdens de propagatie door een industriële site
- D_{huis} , de attenuatie van het geluid tijdens de propagatie door een bebouwd gebied

Voor deze bijkomende bijdragen aan de attenuatie kan het propagatiepad goed benaderd worden door de boog van een cirkel met een straal van 5 km ([zie figuur 10](#))

Vegetatie ($D_{\text{vegetatie}}$)

De vegetatie van bomen en struiken levert een kleine bijdrage aan de attenuatie, op voorwaarde dat de beplanting voldoende dicht is om het zicht langs het propagatiepad volledig te belemmeren, m.a.w. het moet onmogelijk zijn om een op een korte afstand doorheen de beplanting te kijken. De attenuatie door beplanting is het grootst als de beplanting zich dicht bij de bron of de ontvanger bevindt. ([zie figuur 10](#))

De eerste lijn in [tabel 5](#) geeft de attenuatie bij dichte beplanting als de totale lengte van het pad door de beplanting tussen 10 en 20 m varieert ; als de padlengte door de beplanting tussen 20 en 200 m bedraagt, resulteert dat in de tweede lijn. Voor padlengtes groter dan 200 m door dichte beplanting mogen we de waarde van de attenuatie voor 200 m gebruiken.

Industriële sites (D_{site})

Industriële sites kunnen attenuatie veroorzaken doordat het geluid verstrooid wordt door installaties (en andere objecten), behalve als ze al meegerekend worden in D_{scherm} of bij de specificatie van de bron. We omschrijven ze met D_{site} . Onder installaties verstaan we: buizen, palen, pijpen, kleppen, dozen, structurele elementen, enz.

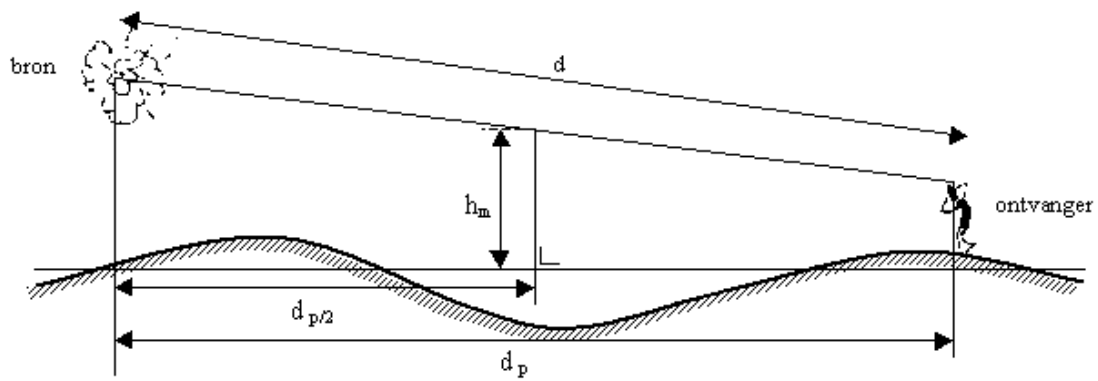
De waarde van D_{site} is sterk afhankelijk van de site, dus is het aangeraden om D_{site} te meten. Om een eerste schatting te maken kunnen de waarden uit [tabel 6](#) gebruikt worden. De attenuatie neemt lineair toe met de lengte van pad d_s door de installaties ([zie figuur 11](#)) met een maximum van 10 dB.

© INTEC, Universiteit Gent

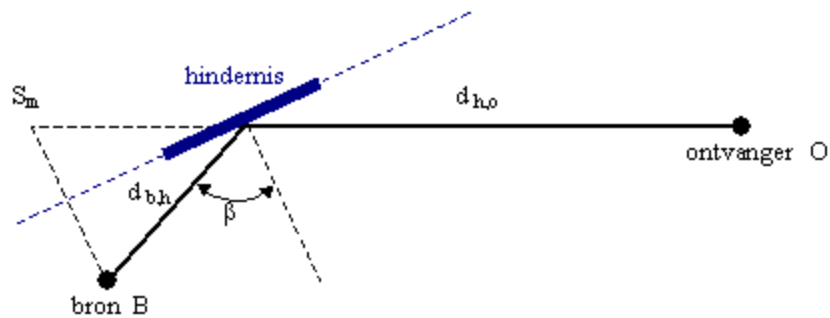
4.1.6 Figuren



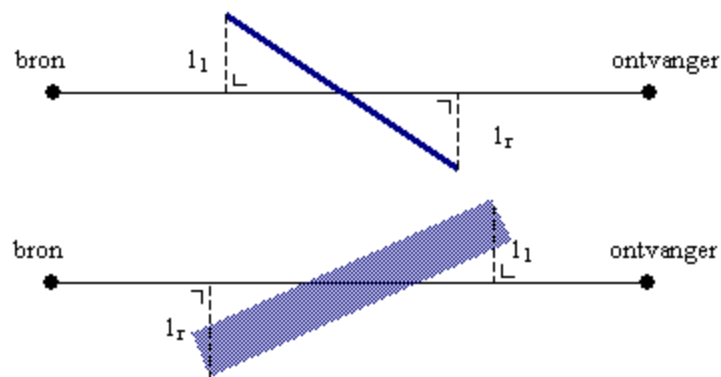
*Figuur 1: om de attenuatie door de grond te bepalen
worden er drie gebieden onderscheiden*



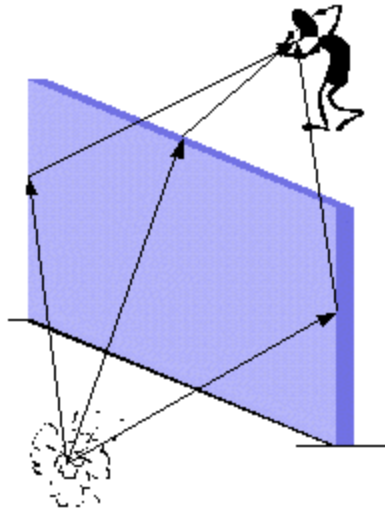
Figuur 3: een methode om de gemiddelde hoogte h_m te bepalen



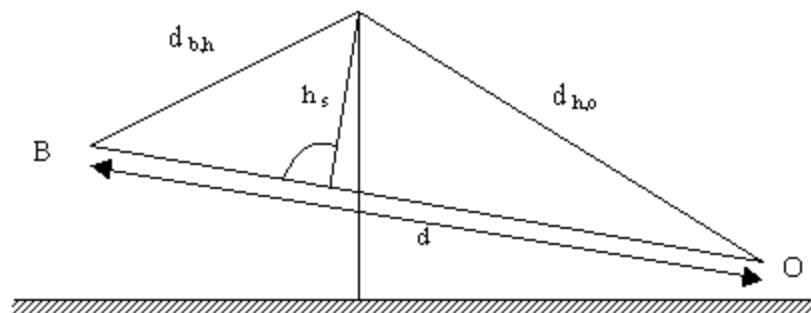
Figuur 4: speculaire reflectie door een obstakel. Het pad $d_{bh} + d_{h,o}$ verbindt de bron B met de ontvanger O. De invalshoek b is even groot als terugkaatsingshoek. Voor de ontvanger lijkt het geluid te komen van de "spiegelbron" S_m



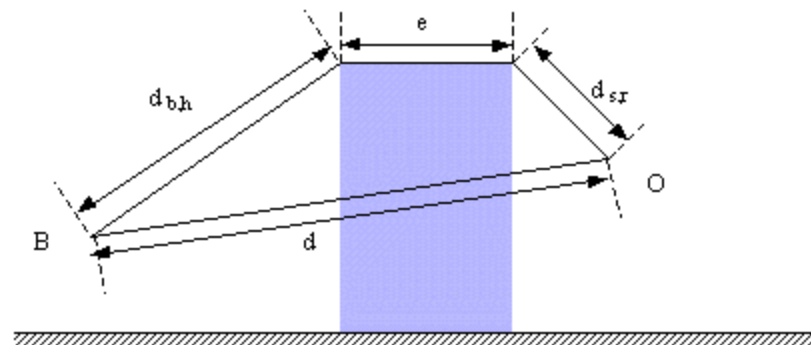
Figuur 5: twee voorbeelden van obstakels. Een object wordt als een obstakel met een afschermd effect gezien als de horizontale projectie op de loodlijn op de verbindinglijn tussen bron en ontvanger groter is dan de golflengte, m.a.w.: $(l_1 + l_r > l)$

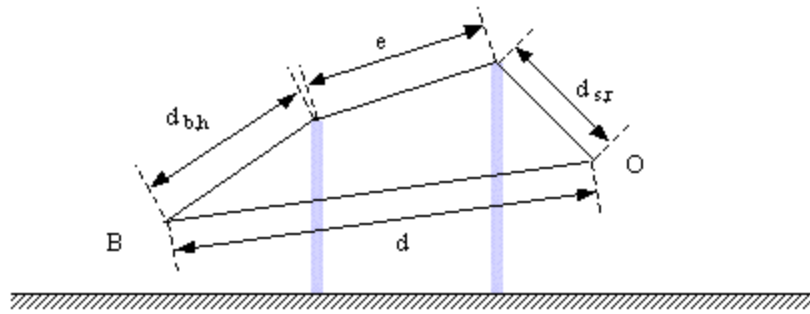


Figuur 6: de verschillende wegen van geluidpropagatie bij een scherm

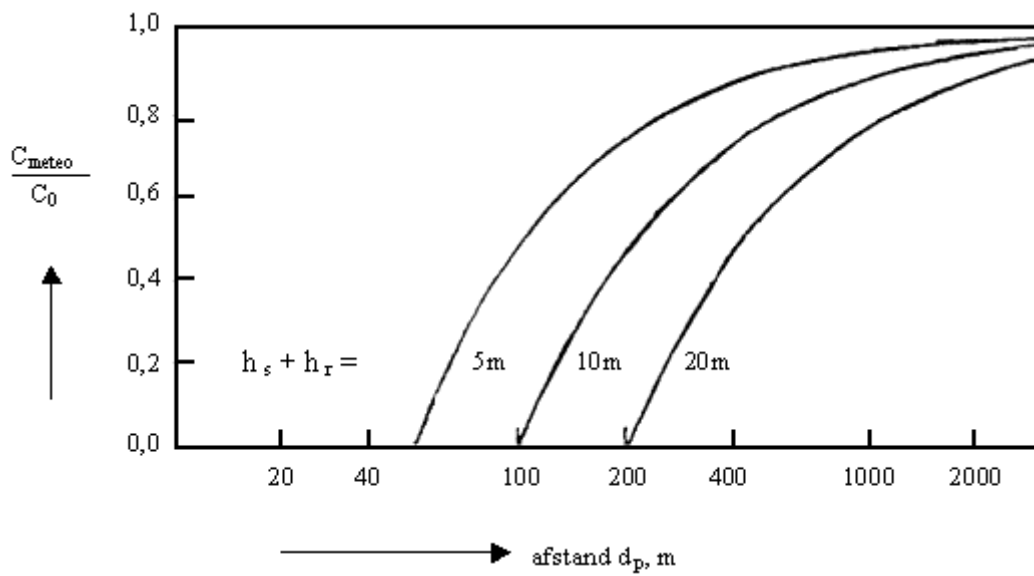


Figuur 7: Geometrische grootheden voor het bepalen van het verschil in padlengte bij enkele diffractie





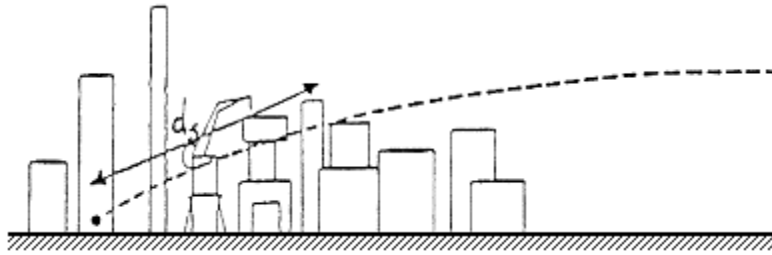
Figuur 8: geometrische grootheden voor het bepalen van het verschil in padlengte bij dubbele diffractie



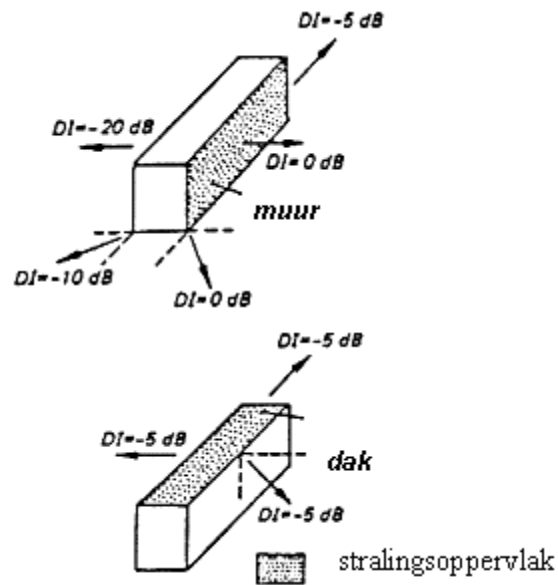
Figuur 9: De meteorologische correctie C_{meteo}



Figuur 10: de attenuatie te wijten aan propagatie door vegetatie neemt lineair toe met de propagatie-afstand d_f door de beplanting. $d_f = d_1 + d_2$. De straal van het gebogen pad is 5 km



Figuur 11: de attenuatie D_{site} neemt lineair toe met de propagatie-afstand d_s door de installaties en de industriële inplantingen.



Figuur 12: benaderingen voor de directiviteit indices van geluid stralingsoppervlakken van gebouwen (muren, daken, ramen, deuren). De pijlen duiden op de richting van de straling voor de index.

4.1.7 Tabel 1

T (°C)	Relatieve vochtigheid (%)	Nominale middenbandfrequentie (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,12	0,41	1,04	1,93	3,66	9,66	32,8	117
20	70	0,09	0,34	1,13	2,80	4,98	9,02	22,9	76,6
30	70	0,07	0,26	0,96	3,14	7,41	12,7	23,1	59,3
15	20	0,27	0,65	1,22	2,70	8,17	28,2	88,8	202
15	50	0,14	0,48	1,22	2,24	4,16	10,8	36,2	129
15	80	0,09	0,34	1,07	2,40	4,15	8,31	23,7	82,8

4.1.8 Tabel 2

Nominale middenband frequentie (Hz)	D _b of D _o (dB)	D _m (dB)
63	-1,5	-3q
125	-1,5 + G.a'(h)	-3q (1 - G _m)
250	-1,5 + G.b'(h)	
500	-1,5 + G.c'(h)	
1000	-1,5 + G.d'(h)	
2000	-1,5 (1 - G)	
4000	-1,5 (1 - G)	
8000	-1,5 (1 - G)	

Waarbij

$$a'(h) = 1,5 + 3,0.e^{-0,12(h-5)^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right) + 5,7.e^{-0,09h^2} \left(1 - e^{-2,8.10^{-6}.d_p^2}\right)$$

$$b'(h) = 1,5 + 8,6.e^{-0,09.h^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$$

$$c'(h) = 1,5 + 14,0.e^{-0,46.h^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$$

$$d'(h) = 1,5 + 5,0.e^{-0,9.h^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$$

$$q = 0 \text{ als } d_p \leq 30(h_b + h_o)$$

$$q = 1 - \frac{30(h_b + h_o)}{d_p} \text{ als } d_p > 30(h_b + h_o)$$

4.1.9 Tabel 3

object	r
vlakke harde wanden	1
muren van gebouwen met ramen en kleine uitsteeksels of instulpingen	0,8
fabrieksmuren waarvan de helft van de muren bestaat uit openingen, toestellen, pijpen,...	0,4
open installaties (pijpen, torens, ...)	0

4.1.10 Tabel 5

propagatie afstand d_f (in m)	nominale middenbandfrequentie (in Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$10 \leq d_f \leq 20$	attenuatie (in dB)							
	0	0	1	1	1	1	2	3
$20 \leq d_f \leq 200$	attenuatie (in dB/m)							
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

4.1.11 Tabel 6

63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

4.2 Software voor het berekenen van geluidimmissie



In de experimenteerruimte kan je experimenteren met een applet die de geluidimmissie berekent conform ISO9613-2. (De schermwerking is hier wel niet in rekening gebracht)

Er zijn verschillende softwareproducten op de markt, die de berekeningsmethode voorgesteld in ISO9613-2, implementeren. Hieronder worden er twee vermeld. Deze opsomming is zeker niet limitatief en geeft geen persoonlijke voorkeur van de auteurs weer.



Soundplan (<http://www.soundplan.com/>)

IMMI (<http://www.woelfel.de/woelfe/WMSeng/immi-40e.htm>)

5 Geluid in een afgesloten ruimte

In een vrij veld propageert geluid rechtstreeks of via enkele reflecties op wanden van de bron naar de ontvanger. In een afgesloten ruimte (een woonkamer, een concertzaal, een fabriekshal) zullen zeer veel reflecties optreden. Wenst men al deze reflecties accuraat in rekening te brengen, dan kan men gebruik maken van een beeldbronnenmodel. Voor elk vlak stukje wand kan in principe een beeldbron nodig zijn en ook meervoudige reflecties moeten in rekening gebracht worden. Dit geeft snel aanleiding tot lange rekentijden. Men kan het probleem ook op een statistische manier oplossen. Dan opteert men voor stralentrek en volgt men verschillende random afgevuurde geluidsstralen vanuit de bron. Beide vorige methodes leveren een vrij nauwkeurig beeld van de geluidsverdeling in de afgesloten ruimte indien de geluidsfrequentie niet te laag is. Is men minder geïnteresseerd in de exacte verdeling van het geluid, dan kan een eenvoudige theorie gebaseerd op een reverberant geluidveld toegepast worden.

Tenslotte moet vermeld worden dat bij lagere frequenties en voor geluiden met grote coherentielengte (bijvoorbeeld zuivere tonen), staande golven en eigenmodes in de ruimte kunnen ontstaan. Deze kunnen aanleiding geven tot een sterke opslingering van lage frequenties.

© INTEC, Universiteit Gent

5.1 Het reverberant geluidveld of galmveld

Het totale geluidveld in een afgesloten ruimte kan gesplitst worden in twee delen. Enerzijds zullen geluidsgolven de waarnemer rechtstreeks bereiken. Dit veldgedeelte van het geluid wordt de vrijeveldbijdrage of het directe geluid genoemd. Daarnaast onderscheidt men het reverberant veld bestaande uit alle geluidsgolven die minstens reeds één reflectie op een wand ondergingen.

Een vrij veld is een milieu waarin zich geen obstakels bevinden voor de propagatie van het geluid. In het vrijeveld propageren de geluidsgolven volgens een rechte lijn. Voor het vrijeveld weten we dat de akoestische intensiteit op voldoende grote afstand van een bron in dit vrijeveld afneemt als $1/R^2$ waarbij R de afstand tussen bron en waarnemer is. De meeste bronnen zullen niet in alle richtingen evenveel stralen. Deze richtingsafhankelijkheid uit zich in de relatie tussen akoestische intensiteit I op een afstand R in een bepaalde richting en akoestisch vermogen van de bron W :

$$I = F \frac{W}{4\pi R^2}$$

waarbij F afhankelijk is van de richting.

Het reverberant veld is in tegenstelling tot het vrijeveld samengesteld uit geluidsgolven die minstens een terugkaatsing aan een wand hebben ondergaan. Dit type van veld is belangrijk in een ruimte waarin de geluidsgolven verschillende weerkaatsingen ondergaan voordat ze uitsterven. De geluidsgolven propageren kriskras door elkaar en men kan aannemen dat het reverberant geluidsniveau ongeveer overal in de ruimte even sterk is. Veronderstel een ruimte met akoestisch sterk weerkaatsende wanden. Als we in deze ruimte een geluidsbron plaatsen, dan zal de geluidenergie die zich in de ruimte bevindt oneindig toenemen. In de praktijk zal de akoestische energie satureren op een constant niveau, dat bepaald wordt door het evenwicht van het door de bron continu toegevoegde vermogen en het in de ruimte en de wanden geabsorbeerde vermogen. Laten we dit evenwicht nauwkeuriger onderzoeken.

Stel dat de bronnen in de ruimte een vermogen W uitstralen. Bij de eerste reflectie zal daarvan een gedeelte W geabsorbeerd worden, zodat aan het reverberant veld een vermogen W_r toegevoegd wordt gegeven door:

$$W_r = W - W\bar{\alpha} = W(1 - \bar{\alpha})$$

Hierbij is α de gemiddelde geluidsabsorptiecoëfficiënt voor alle aanwezige wanden. De intensiteit I in het reverberant veld wordt gedefinieerd als de reverberante energie die per tijdseenheid door een eenheidsoppervlak passeert in één richting. Op het oppervlak S valt dus een reverberant vermogen $S \cdot I_r$ in, waarvan een fractie α verdwijnt door absorptie.

Gelijkstellen van het akoestisch vermogen dat aan het reverberant veld wordt toegevoegd en het akoestisch vermogen dat uit het reverberant veld wordt geabsorbeerd, levert :

$$I_r = \frac{W(1-\bar{\alpha})}{S\bar{\alpha}} = \frac{W}{Z_k}$$

met Z_k de zaalconstante, gedefinieerd als:

$$Z_k = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$$

De waarde van α is vaak gering. In dit geval is Z_k te benaderen door $Z_k = S\alpha$. Merk op dat de intensiteit in een reverberant geluidveld onafhankelijk is van de afstand tussen bron en waarnemer.

Het totale geluidveld in een afgesloten ruimte is zoals gezegd de som van het vrije en het reverberant veld. Uit de totale intensiteit kan het geluidsdrukkniveau in dB bepaald worden als:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{F}{4\pi R^2} + \frac{4}{Z_k} \right)$$

De factor 4 in deze formule wordt afgeleid uit de definitie van intensiteit in het reverberant veld en de hypothese dat in het reverberante geluidveld de akoestische energie gelijkmatig uit alle richtingen invalt. De intensiteit die in een richting door een oppervlak vloeit, wordt bekomen door integratie van de loodrechte component op het oppervlak over alle invalrichtingen. $L_p - L_w$ is in functie van de afstand tussen bron en waarnemer is voorgesteld in figuur 1. Uit de figuur blijkt hoe de waarnemer overgaat van een vrij veld naar een reverberant veld als hij zich van de bron verwijderd. De overgang is vrij gelijkmatig en gebeurt op grotere afstand van de bron als de zaal meer absorberend is. Merk ook op dat als x-as voor $R/\sqrt{F}$ gekozen is. Als de bron specifiek in de richting van de waarnemer straalt (grote F voor die richting), dan zal deze waarnemer tot op grotere afstand een vrij veld detecteren.

Als de waarnemende microfoon zich heel dicht bij de bron bevindt, dan kan moeilijk nog een wiskundig nauwkeurige beschrijving van de meting van het geluidsniveau gegeven worden. Er moet rekening gehouden worden met het akoestisch vermogen dat door verschillende delen van de bron wordt gegenereerd. Bovendien komen de geluidsgolven op de microfoon aan uit verschillende invalshoeken, in tegenstelling tot de situatie in het vrije veld. Kortom een totaalprobleem, dat rekening houdt met alle trillende oppervlakken rondom de bron en de microfoon zelf, wat ook met mogelijke diffracties en interferenties moet opgelost worden. Het bekomen akoestisch veld wordt het nabije veld van de bron genoemd. Waarnemen van het nabije veld van een bron kan nuttig zijn, maar dit veld kan enkel gebruikt worden om het akoestisch vermogen van de bron te bepalen aan de hand van vectorintensiteitsmetingen.

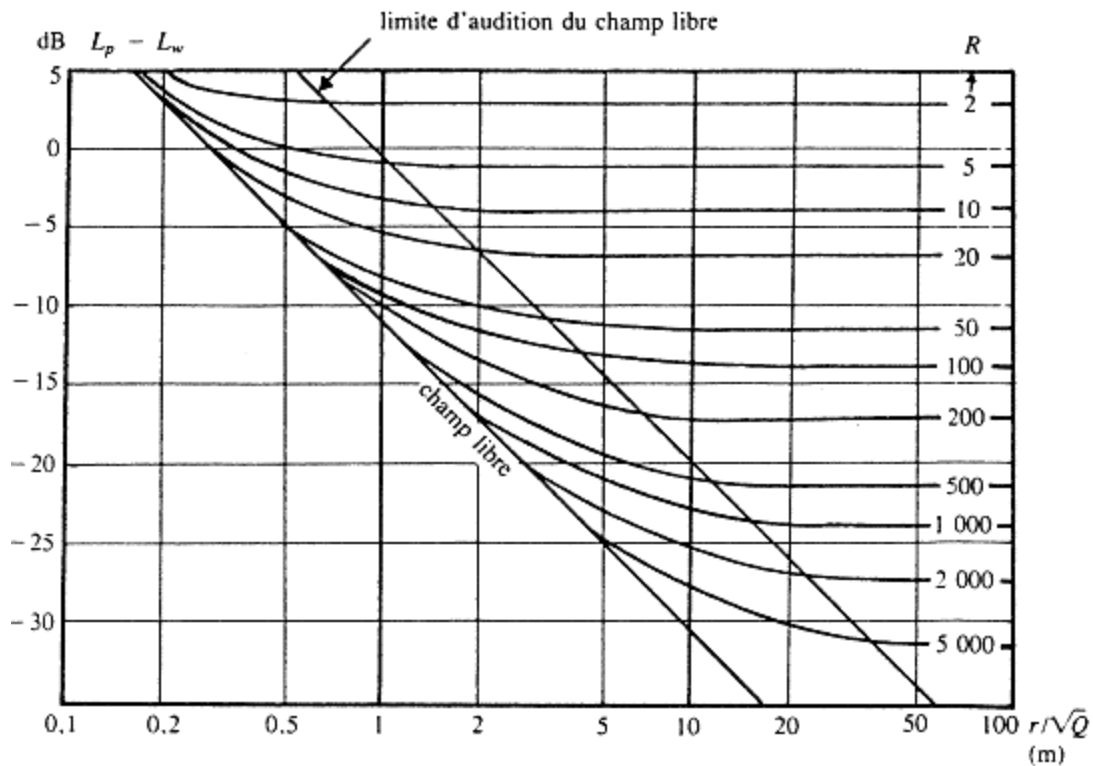


fig. 1: Verschil tussen het geluidsniveau en het akoestisch vermogen van de bron in functie van de afstand voor verschillende zaalconstanten.

© INTEC, Universiteit Gent

5.2 Stralentrek

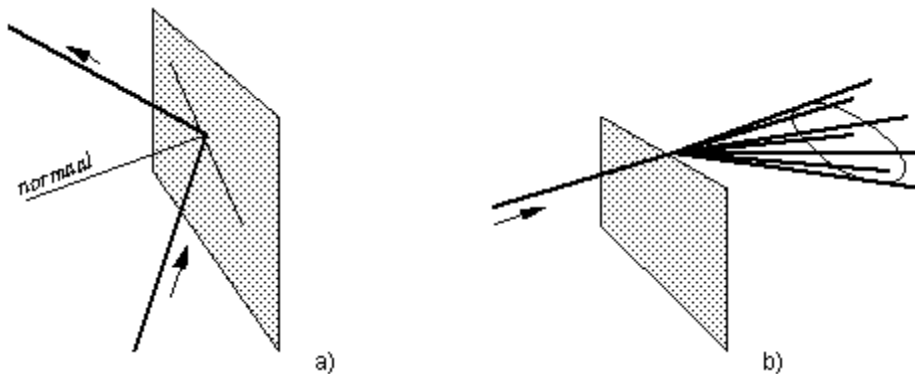
5.2.1 Theoretische achtergrond

De akoestische straal

De propagatie van geluid is een golfverschijnsel. In het bijzonder propageert geluid in lucht als een longitudinale golf. Een exacte behandeling van het geluidsverschijnsel houdt met dit golfkarakter rekening. Indien echter aan enkele voorwaarden, die samengevat kunnen worden als "de propagatieruimte is groot ten opzichte van de golflengte", voldaan is, dan kan een benaderde werkwijze gevolgd worden. De benadering bestaat erin aan te nemen dat het geluidsvermogen dat uitgestraald wordt door een bron, verdeeld kan worden in een aantal oneindig smalle bundels, die onafhankelijk van elkaar door de ruimte propageren. Indien het propagatiemedium geen gradiënten in geluidssnelheid bevat (bijvoorbeeld door temperatuursgradiënten of door luchtstromen), dan zal de geluidbundel volgens een rechte lijn propageren. De oneindig smal onderstelde geluidbundel wordt geluidsstraal genoemd. De analogie met licht is opvallend. Vermits de licht-golflengte klein is ten opzichte van alle voorwerpen met typische afmetingen die ons in het dagelijks leven omringen, wordt licht heel dikwijls met stralen beschreven.

Reflectie

De reflectie van geluid op een akoestisch hard voorwerp of een wand kan op eenvoudige wijze beschreven worden met behulp van geluidsstralen indien de typische afmetingen van het voorwerp of de wand (inclusief zijn kromtestraal) groot zijn ten opzichte van de golflengte en indien het voorwerp of de wand geen oneffenheden bevatten met typische grootteorde van de golflengte. Indien aan deze voorwaarden voldaan is, dan voldoet de reflectie van een geluidsstraal aan een eenvoudige reflectiewet : de gereflecteerde geluidsstraal ligt in het vlak gevormd door de invallende straal en de normaal op het weerkaatsend oppervlak ; de hoek met deze normaal is dezelfde voor de invallende en de gereflecteerde straal (figuur 1a).



figuur 1. a) Reflectie van een geluidsstraal op een vlakke wand;

b) diffractie van een geluidsstraal op een rand.

Het akoestisch gedrag van het hiervoor beschreven perfect vlak en hard voorwerp correspondeert met het optisch gedrag van een spiegel. Indien het oppervlak oneffenheden bevat met een hoogte overeenkomend met de golflengte van het invallend geluid, dan zal diffuse reflectie ontstaan. Het geluid wordt nu in verschillende richtingen teruggekaatsd, net zoals licht dat op een mat oppervlak invalt, de volledige ruimte verlicht. Deze diffuse reflectie kan nog steeds benaderd beschreven worden door middel van geluidsstralen, maar bij elke reflectie moeten nu verschillende gereflecteerde stralen ingevoerd worden, hetgeen de studie vanzelfsprekend een stuk complexer maakt.

Diffractie, diffuse reflectie en interferentie

Diffractie en interferentie zijn typische golfverschijnselen. Diffractie treedt op bij de interactie van een geluidsgolf met een klein voorwerp of een scherpe rand (kleine kromtestraal). De geluidsgolf buigt als het ware rond het kleine voorwerp of de scherpe rand en bereikt op die manier de zone achter het voorwerp of de rand. Interferentie ontstaat wanneer twee of meer gecorreleerde geluidsgolven (typisch afkomstig van dezelfde bron via twee verschillende wegen) met elkaar interageren. Er ontstaat een typisch patroon van luide (constructieve interferentie) en stille zones (destructieve interferentie). Aangezien bij een geometrische benadering van het zaalakoestisch probleem door middel van geluidsstralen, elk golfkarakter verwaarloosd wordt, worden diffractie en interferentie niet in rekening gebracht.

Soms wordt in een geometrische benadering toch rekening gehouden met diffractie aan randen. Hiertoe splitst men een invallende geluidsstraal nabij een scherpe rand op in verschillende deelstralen (figuur 1b). Door het sterk toenemend aantal geluidsstralen dat gevolgd moet worden, verhoogt de complexiteit van het probleem in belangrijke mate.

Een voorwerp waarvan het oppervlak oneffenheden vertoont, die van de grootteorde zijn van de golflengte, zal in werkelijkheid een invallende geluidsgolf niet reflecteren zoals de

geometrische acustica dit voorspelt. Het geluid wordt verstrooid in verschillende richtingen. Het effect is vergelijkbaar met de reflectie van licht op een mat oppervlak. Om de diffuse reflectie in de geometrische acustica in rekening te brengen zal men opnieuw bij iedere reflectie de geluidsstraal opsplitsen in een set van gereflecteerde stralen, die elk een gedeelte van de akoestische energie verder propageren. Ook diffuse reflectie verhoogt de complexiteit van het probleem in belangrijke mate.

Interferentieverschijnselen kunnen eveneens benaderd in de geometrische theorie geïncorporeerd worden. Men moet dan voor elke geluidsstraal eveneens de afgelegde weg en mogelijke fasedraaiingen aan absorberende vlakken (zie verder) bijhouden. De aangepaste theorie verhoogt het toepassingsgebied enigszins doch een belangrijk voordeel van de stralenbenadering nl. haar eenvoud wordt deels opgegeven.

Absorptie

De meeste wanden in een zaal zijn niet akoestisch perfect hard. Bij reflectie wordt een gedeelte van de akoestische energie in de straal geabsorbeerd. Daarnaast geeft de reflectie ook aanleiding tot een fasedraaiing. De akoestische golf wordt als het ware vertraagd bij zijn interactie met de wand. De absorptie kan in rekening gebracht worden door de sterkte van de geluidsstraal bij elke reflectie te verzwakken overeenkomstig de absorptiecoëfficiënt - de *absorptiecoëfficiënt* α van een wand is gedefinieerd als de verhouding van geabsorbeerd (+ doorgelaten) vermogen tot invallend akoestisch vermogen - van de wand of het voorwerp. Als bijkomende moeilijkheid moet vermeld worden dat de absorptiecoëfficiënt meestal functie is van de hoek waaronder de geluidsgolf invalt op de wand.

Een bijzonder geval van absorberende wand is het publiek zelf. Personen, samen met hun poreuze kleren zorgen voor een belangrijke absorptie. Bovendien geeft de typische periodieke structuur van rijen stoelen en het feit dat het geluid meestal rakelings over het publiek invalt, aanleiding tot ingewikkelde absorptieverschijnselen, die niet met geometrische acustica te verklaren zijn. Indien er ook reflecties op de zoldering te verwachten zijn, dan kan men de bijzondere invloed van het publiek geometrisch benaderen wegens de relatief geringe bijdrage van de rakelingse geluidsgolf tot het totale geluidsniveau. Voor openluchttheaters, waar geen reflectie op de zoldering optreedt, zal men de opeenvolgende rijen toeschouwers steil (veel steiler dan nodig is voor een goed zicht op het podium) laten oplopen om op die manier problemen met rakelingse geluidsgolven te vermijden.

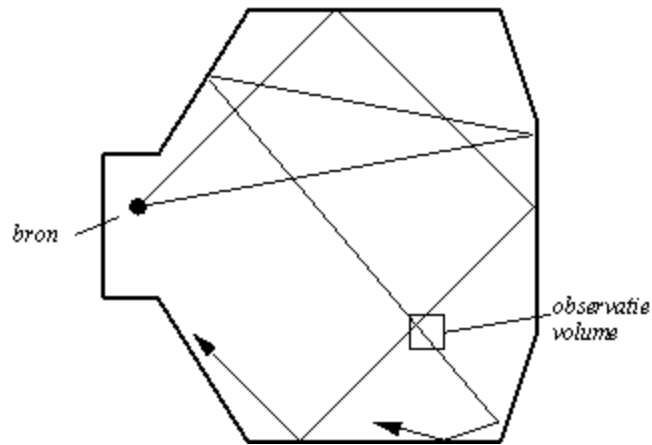
© INTEC, Universiteit Gent

5.2.2 Praktische implementatie van de theorie

Voor praktische toepassing worden de regels van de geometrische acustica in een computerprogramma geïmplementeerd. De invoer bestaat uit de geometrie van de zaal, de absorptiecoëfficiënten (voor verschillende frequenties) van de verschillende aanwezige materialen, de locatie en het vermogen van de geluidsbronnen en de observatiepunten of -vlakken. Verder kunnen nog enkele parameters van het geometrisch model zoals het aantal stralen en de grootte van de observatievolumes gewijzigd worden.

Een zogenaamd stralentrekprogramma zal vervolgens vanuit de verschillende bronnen een groot (opgegeven) aantal geluidsstralen in willekeurige richtingen laten vertrekken. De rechte lijn van de straal wordt gevolgd tot deze een van de aanwezige wanden of voorwerpen kruist. Nu worden de regels van de geometrische acustica voor reflectie en absorptie toegepast, waaruit richting en zin van de gereflecteerde straal worden afgeleid. Dit schema wordt herhaald tot de straal zodanig verzwakt is (door de absorptie bij elke reflectie en eventueel de luchtabsorptie) dat verdere bijdragen tot het geluidveld verwaarloosbaar worden geacht. In elk van de observatiepunten wordt een observatievolume geconstrueerd (figuur 1). Telkens als een geluidsstraal door dit volume passeert, telt men het geluidsvermogen bij het geluidsvermogen in het observatievolume. Uiteindelijk bekomt men hieruit de totale intensiteit.

Men kan eveneens de richting van elke straal registreren om een beeld te krijgen van de belangrijkste invalsrichtingen voor geluid. Ten slotte kan men ook de aankomsttijden van de stralen registreren en daaruit afleiden hoe snel het geluidveld afneemt na een kortstondige geluidinjection (pistoolschot bijvoorbeeld). Deze afname staat in verband tot de reverberatie.



figuur 1. Enkele stralen en observatievolume gebruikt bij een stralentrekmethode.

Er bestaan enkele varianten op deze basismethode. We vermelden de bundeltrek methode die een uitdijende breedte aan de straal toekent en methodes die diffractie en interferentie in rekening brengen.

© INTEC, Universiteit Gent

5.3 Staande golven en eigenmodes

In de fysica hebben we geleerd, dat indien men een snaar aan het trillen brengt, deze een toon zal voortbrengen met een frequentie bepaald door de lengte van de snaar. Deze frequentie noemt men een eigenfrequentie van de snaar. De eigenfrequentie van een systeem is dus de frequentie waarbij het systeem een vrije trilling uitvoert.

Dit fenomeen doet zich ook voor in de akoestiek. We spreken dan van eigenmoden van een ruimte. De eigenmoden van een ruimte zijn oplossing van de [golfvergelijking](#) die voldoen aan de randvoorwaarden (b.v. een wand al dan niet reflecterend is).

Voorbeelden

1. Beschouwen we een gesloten buis met lengte l_x , waarvan de interne diameter klein is vergeleken met de golflengte van de geluidsgolf. In dat geval treden er geen dwarsreflecties op in de buis en mogen we veronderstellen dat er een vlak golffront, dat beweegt in de lengterichting van de buis, optreedt.
De randvoorwaarden voor de buis zijn: $v_x = 0$ voor $x = 0$ en voor $x = l_x$ (de deeltjes staan stil op de wanden die de buis afsluiten).

Hieruit kunnen we bepalen dat voor gehele waarden van $m \neq 0$.

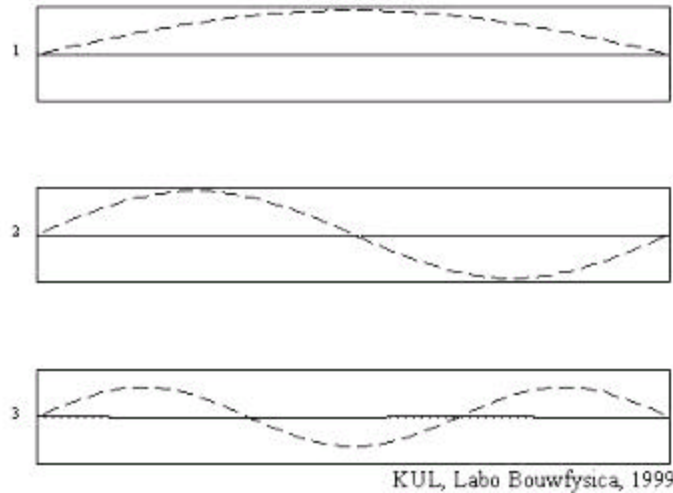
$$k_m = \frac{m \cdot \pi}{l_x}$$

Daaruit berekenen we de eigenfrequenties als

$$f_m = \frac{\omega_m}{2 \cdot \pi} = \frac{m \cdot c}{2 \cdot l_x}$$

De lengte van de buis is een geheel veelvoud van de helft van de golflengtes die met deze frequenties overeenstemmen.

De eerste drie eigenmoden van een gesloten buis zijn voorgesteld in de volgende video.



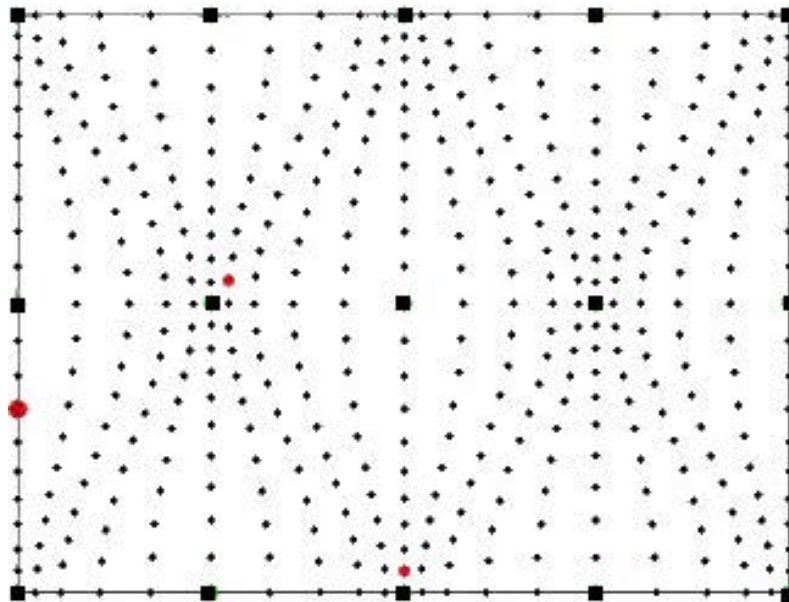
KUL, Labo Bouwfysica, 1999

De stippellijn geeft het verloop van de deeltjessnelheid, de volle lijn de druk.



2. Beschouwen we een gesloten rechthoekige ruimte met afmetingen l_x , l_y en l_z . Bepaal nu zelf de randvoorwaarden en de eigenfrequenties die met deze ruimte overeenkomen.

Het volgende filmpje toont de beweging van de deeltjes voor de eigenmode (4,2,0). We merken opnieuw op dat de lengtes l_x en l_y van de kamer een geheel veelvoud van de helft van de golflengtes l_x en l_y zijn die met deze eigenfrequentie overeenstemmen.



KULeuven, Laboratorium Bouwfysica, 1999

De vierkantjes zijn gegeven ter verduidelijking. Ze geven de positie van de knopen weer. De deeltjes die zich op deze plaatsen bevinden, staan stil. Verder merken we op dat aan de randen de deeltjes enkel bewegen in het vlak van de wand en niet er loodrecht op.

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

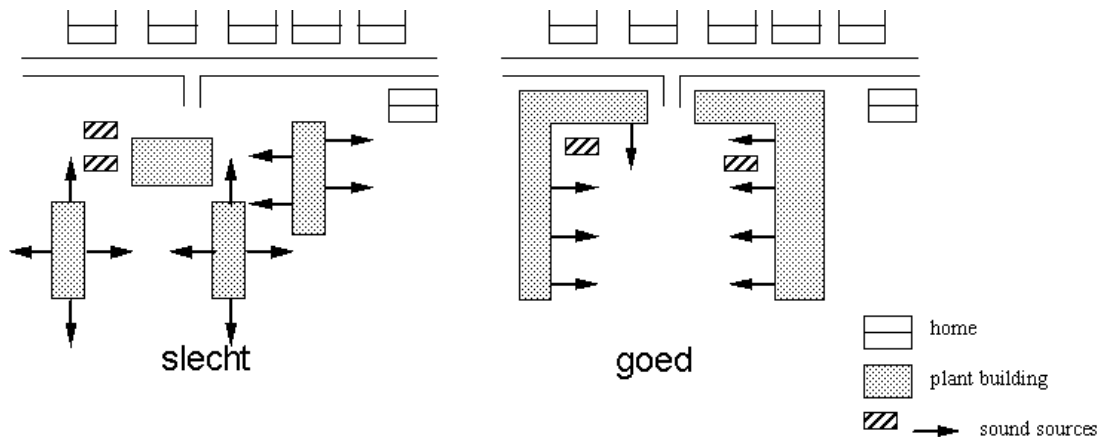
6 Bestrijden van geluidhinder

Bestrijden van geluidhinder vereist naast een goed inzicht in het ontstaan en de propagatie van geluid ook inzicht in de productieprocessen of de werking van machines en voertuigen, die er aan de bron van liggen. Reductie van de geluidemissie door toestellen en voertuigen is daarom het resultaat van de samenwerking van verschillende experts en behoort tot de specifieke know-how van de constructeurs. Hier worden enkele concepten gegeven, die algemener bruikbaar zijn.

© INTEC, Universiteit Gent

6.1 Ruimtelijke ordening

Een goede ruimtelijke ordening kan vele geluidhinderproblemen vermijden. De vermindering van geluidsdrumniveau met toename van de afstand tussen geluidsbron en stiltebehoevende zone is dan ook aanzienlijk. Goede ruimtelijke ordening kan zowel op macroschaal als op microschaal geïmplementeerd worden. Naast het vergroten van de afstand tussen bron en ontvanger kan goede ruimtelijke ordening er ook in bestaan optimaal gebruik te maken van de 'natuurlijke' afschermende werking door (bedrijfs)gebouwen. Onderstaande figuur geeft een voorbeeld van implementatie van dit idee. In de linker figuur staan de geluidsbronnen en geluidsemitterende openingen in gebouwen vlak bij de woningen en zijn deze niet afgeschermd. In de rechter figuur worden 'stille' gebouwen zoals kantine of opslagruimte als hoge geluidschermen tussen bron en woning gebruikt. Het effect van deze gebouwen kan berekend worden met de formules die ook voor meer traditionele schermvormen gebruikt worden (b.v. ISO 9613).



Het principe geïllustreerd in bovenstaande figuur kan ook omgekeerd gebruikt worden. Door woningen een binnenplaats te laten omsluiten ontstaat op deze binnenplaats een zone waar verkeerslawaaï nauwelijks doordringt. Deze zone als park of voor individuele tuinen in de stad zeer geschikt.

© INTEC, Universiteit Gent

6.2 Bron – propagatie – waarnemer

Een geluidhinderprobleem wordt gekenmerkt door een geluidsbron, een pad waarlangs het geluid propageert en een waarnemer. Alle geluidhinderproblemen kunnen behandeld worden:

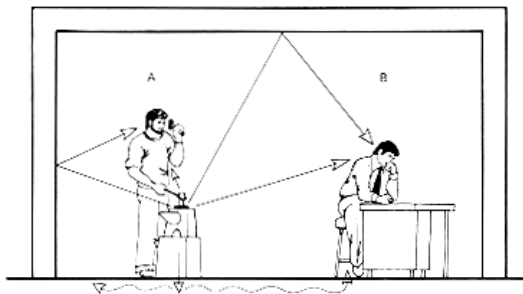
- aan de bron, ofwel door een verbetering van het mechanisch ontwerp ofwel door het aanbrengen van absorberende materialen en omkastingen.
- tijdens de propagatie van bron naar ontvangen eventueel via reflecterende wanden. De geluidsschermen zijn hiervan een goed voorbeeld.

- aan de ontvanger (i.e. nabij de luisteraar) door een omkasting (b.v. huis) rond deze persoon op te trekken

In vele gevallen zal een combinatie van maatregelen op de drie plaatsen nodig zijn. Men heeft vastgesteld dat een behandeling van het geluidhinderprobleem aan de bron meestal het efficiëntst is in termen van gereduceerde dB/Fr.. Daarenboven zal een goed mechanisch ontwerp resulteren in een zacht draaiende machine en een langere levensduur. Bestrijden van geluidhinder aan de bron wordt het best gestart tijdens een zo vroeg mogelijk stadium van het ontwerp van een toestel. Voor een gebruiker vertaalt dit zich tot rekening houden met geluidemissie van de toestellen bij het vergelijken van het aanbod van verschillende fabrikanten. Een gelijkaardige bedenking kan gemaakt worden i.v.m. infrastructuurwerken. Indien tijdens de planning, om mogelijke geluidhinder te vermijden, een autosnelweg niet doorheen een woonwijk wordt aangelegd, dan zal de latere kost voor geluidhinderbestrijding a.d.h.v. geluidsschermen sterk beperkt kunnen worden. Meestal treedt het geluidsprobleem slechts veel later op nl. wanneer een machine geïnstalleerd is en werkt of wanneer een autosnelweg aangelegd is. Dan bestaat de enige mogelijkheid voor geluidscontrole in het aanbrengen van "add-on" maatregelen, gebaseerd op absorberende en isolerende materialen. Zelfs dan nog blijft het behandelen van de geluidsbron de meest efficiënte en ook de goedkoopste aanpak.

© INTEC, Universiteit Gent

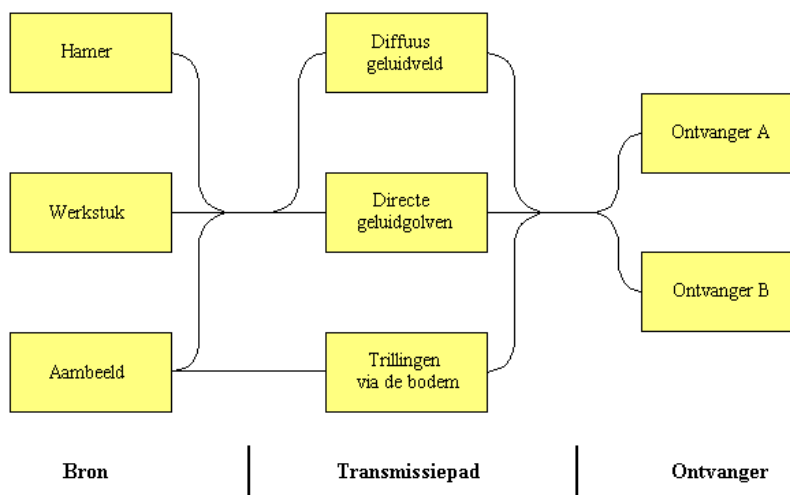
6.2.1 Voorbeeld



Op de figuur hiernaast zie je een uiterst eenvoudige situatie van geluidoverdracht. We kunnen de opdeling maken in de drie elementen, zoals die bij ieder systeem van geluidoverdracht voorkomen : de bron, het transmissiepad en de ontvanger.

Op het blokdiagramma hieronder is een verdere opdeling weergegeven van de elementen :

- de bron bestaat uit drie afzonderlijke componenten,
- evenals het transmissiepad ;
- de twee ontvangers zijn aangeduid : de personen in punten A en B.



Voor de twee ontvangers gelden verschillende criteria : voor de persoon in punt B gelden strengere eisen dan in deze voor punt A.



© WERK, Vrije Universiteit Brussel

6.2.2 Lawaai beheersing

Lawaai beheersing is alle activiteit die erop gericht is het waargenomen geluidveld in het punt van de ontvanger dusdanig te wijzigen dat voldaan wordt aan de voor die ontvanger gestelde eisen. Lawaai beheersing betekent niet noodzakelijk eliminatie of zelfs niet reductie van een geluid : voor de meeste ontvangers worden dan ook maximum- en minimumlimieten vastgesteld waaraan voldaan moet worden.

Beheersing van lawaai en trillingen omvat één of meer van de volgende procedures :

- verlagen van het geluidsvermogeniveau van de bron
- verlagen van het trillingsniveau van de bron
- wijzigen van de spectrale samenstelling van het geluid
- wijzigen van de vorm van de geluidsgolven van impulsachtig geluid
- wijzigen van het achtergrondgeluid
- invoeren van maskeergeluid
- wijzigen van de dosis van het ontvangen geluid

Uit de opdeling van elk systeem van geluidoverdracht in bron, transmissiepad en ontvanger volgt dat we lawaai beheersing kunnen toepassen in elk punt in de ketting van geluidoverdracht.

© WERK, Vrije Universiteit Brussel

6.3 Reductie bronvermogen

6.3.1 Ontstaansmechanismes van geluid

Geluidsbronnen kunnen van heel verschillende aard zijn. Ze kunnen op fysisch niveau opgedeeld worden naargelang de wijze waarop geordende energie aan de luchtmoleculen wordt toegevoegd.

- De werking van een eerste groep geluidsbronnen is gebaseerd op een fluctuatie van het volume dat door de lucht ingenomen wordt. Deze vorm van akoestische energieoverdracht is zeer efficiënt en komt veelvuldig voor. Voorbeelden zijn: een sirene, waarbij fluctuerende lucht wordt losgelaten in de omgeving; een ondoorlaatbaar trillend voorwerp, dat de naburige luchtmoleculen doet meebewegen. Deze bronnen van geluid kunnen op eenvoudige wijze bestudeerd worden door een gepaste kracht f in het rechterlid van de golfvergelijking in te voeren.
- Een minder efficiënte manier om akoestische golven te genereren is gebaseerd op het uitoefenen van een fluctuerende kracht op de luchtmoleculen. Men kan bijvoorbeeld te maken hebben met een niet-stabiele luchtstroom over een hard oppervlak of met een stabiele luchtstroom over een scherpe rand. Een fluit behoort tot deze laatste categorie van geluidsbronnen. Aangezien bij de studie van deze geluidsbronnen niet enkel de akoestische beweging van de moleculen, maar ook de luchtstroom samen in rekening moeten gebracht worden, is een meer algemene propagatievergelijking noodzakelijk (Eulervergelijkingen, Navier-Stokes vergelijkingen). Het probleem is niet-lineair en sterk verschillende lengteschalen kunnen een rol spelen zodat het oplossen van de vergelijkingen tamelijk moeilijk wordt.

De minst efficiënte manier om geluid te produceren, is gebaseerd op een fluctuerend moment dat op de luchtmoleculen wordt uitgeoefend. Dit fluctuerend moment is een gevolg van een sterk niet-stabiele luchtstroom in de vrije ruimte. De effecten die hierbij een rol spelen zijn sterk niet-lineair. Een voorbeeld van dergelijke geluidsbron is een vliegtuigmotor. Het lage akoestisch rendement van deze geluidsbron wordt door omwonenden van een vliegveld geapprecieerd.

© INTEC, Universiteit Gent

6.3.2 Introductie technische mogelijkheden

De hoofdregel bij lawaai-beheersing is dat we in eerste instantie, indien mogelijk, de bron akoestisch aanpakken. Op die manier bekomen we een gelijkwaardige wijziging van de dosis van het ontvangen geluid voor alle potentiële ontvangers.

Lawaai-beheersing aan de bron houdt in :

- wijzigen van de structuur of de configuratie van de bron
- wijzigen van de werkingsmode van de bron
- aanbrengen van bijkomende elementen, zoals dempers en omkastingen, op voorwaarde dat die zich in de onmiddellijke omgeving van de bron bevinden (in het nabije geluidveld)

Bij elk type werktuigmachine of installatie wordt onveranderlijk een deel van de energie-input omgezet in geluidenergie.

- De verhouding gaat in het algemeen ongeveer van 0.01 % tot 2 %, uiteraard afhankelijk van het type : een dieselmotor produceert een stuk meer lawaai dan een elektrische motor met hetzelfde mechanisch vermogen.
- Alhoewel de geproduceerde geluidenergie verwaarloosbaar is ten opzichte van de afgeleverde mechanische energie, is die geluidenergie meestal zo sterk verbonden met de totale energie-output, dat ze quasi onmogelijk kan geëlimineerd worden zonder de machine te stoppen.

© WERK, Vrije Universiteit Brussel

6.3.2.1 Geluid veroorzaakt door machines

De fundamentele lawaaibron ligt in dat deel van de machine waar trillingen optreden.

- Die trillingen ontstaan door cyclische of impulsieve acceleratie- of deceleratiekrachten, die resonanties van machineonderdelen opwekken.
- Op die manier worden dan geluidsgolven uitgezonden over bepaalde frequentiebanden.

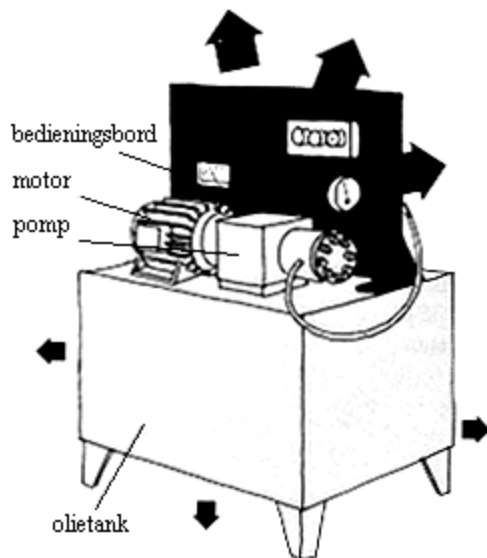
De beste manier om lawaai te beheersen is het ontstaan ervan te beletten : dat betekent dat we de bewegende machineonderdelen moeten wijzigen die de trillingen veroorzaken. Die bewegende machineonderdelen hebben meestal één of meer van de volgende eigenschappen (denk hierbij aan een verbrandingsmotor) :

- rotatie met een last in onbalans
- oscillatie bij translatie of rotatie
- beweging met intermitterende of variabele snelheid
- impact met andere machineonderdelen

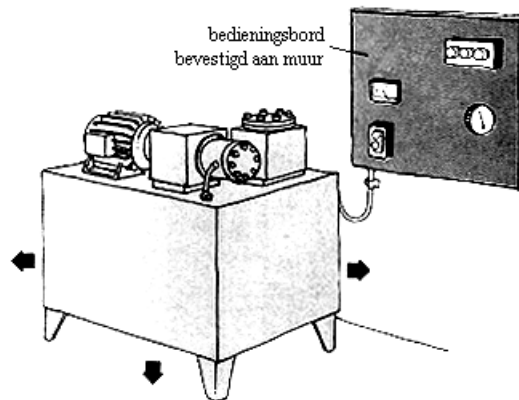
We beschrijven nu een reeks maatregelen om lawaai veroorzaakt door trillingen te verhelpen.

- Verlaging van de amplitude van de trillingen is de belangrijkste maatregel. Hiertoe moeten de acceleratie- of deceleratiekrachten tussen bewegende onderdelen en andere onderdelen geminimaliseerd worden.
- De contactoppervlakken bij glijdende of rollende onderdelen moeten zo glad mogelijk uitgevoerd worden als economisch haalbaar is en goed gesmeerd zijn (met een smeermiddel dat een film creëert dikker dan de oppervlaktefouten).
- De massa van onderdelen die een versnelling ondergaan, moet zo laag mogelijk gehouden worden, en alle roterende onderdelen moeten dynamisch uitgebalanceerd zijn.
- De versnelling van alle bewegende onderdelen moet zo laag mogelijk gemaakt worden : het trillingsniveau wordt verlaagd door de voor snelheidswijzigingen vereiste tijd te maximaliseren.
- De geluidsproductie bij bruuske bewegingen, veroorzaakt door grote versnellingen, wordt verlaagd door de versnelling zo constant mogelijk te houden.
- Door het oppervlak van trillende onderdelen te verkleinen of door de trillingsbron te ontkoppelen van grote oppervlakken (die geluidsgolven kunnen uitzenden) kan de totale geluidsproductie van een machine aanzienlijk verlaagd worden.

Op de figuur hieronder zie je een hydraulisch systeem, waarbij het bedieningsbord vast is bevestigd aan het systeem. Het grote oppervlak van dat bord veroorzaakt veel lawaai.



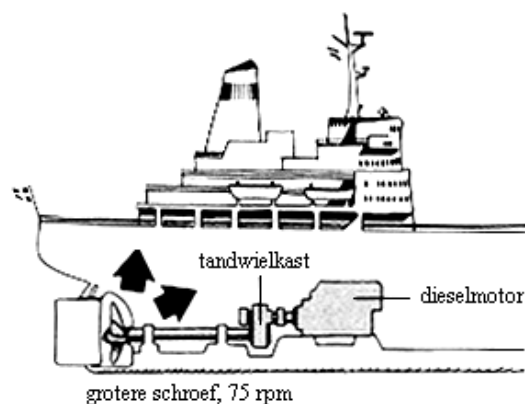
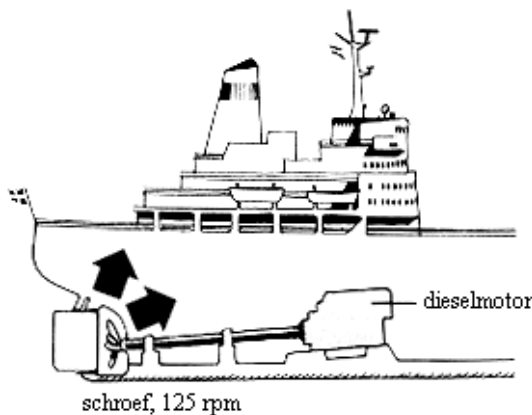
Het bedieningsbord is nu ontkoppeld van het systeem : het totale trillende oppervlak verkleint en het lawaai vermindert.



Door de lagere gevoeligheid van het menselijk oor voor lage frequenties, draagt een verlaging van de frequentie van de trillingen bij tot lawaai-beheersing : indien het mogelijk is de cyclische snelheid van een trilling te verlagen, nemen we een duidelijke vermindering van het lawaai door toedoen van het gewijzigde geluidkarakter waar, ook al blijft de geproduceerde geluidenergie onveranderd.

De dieselmotor van het hieronder afgebeelde schip werkt aan 125 toeren/min. De schroef is er rechtstreeks aan bevestigd. Het lawaai van de schroef is erg storend voor de bemanning.

Een tandwielkast is nu geplaatst tussen dieselmotor en schroef. De schroef is groter om de stuwkracht te behouden, maar draait nu aan 75 toeren/min : het lawaai is verschoven naar een lagere, minder storende frequentie.



Bij machines waar impact aanwezig is (kleppen, tandwielen, ...) kan een aanzienlijke verbetering bekomen worden door metaal-op-metaal-contacten te elimineren (b.v. bekleding met een slijtvaste kunststoflaag). Aan fabricage-toleranties moet veel aandacht besteed worden : door slecht passende onderdelen (b.v. oppervlaktefouten bij lagers) kan impact en dus lawaai ontstaan.

6.3.2.2 Aërodynamisch geluid

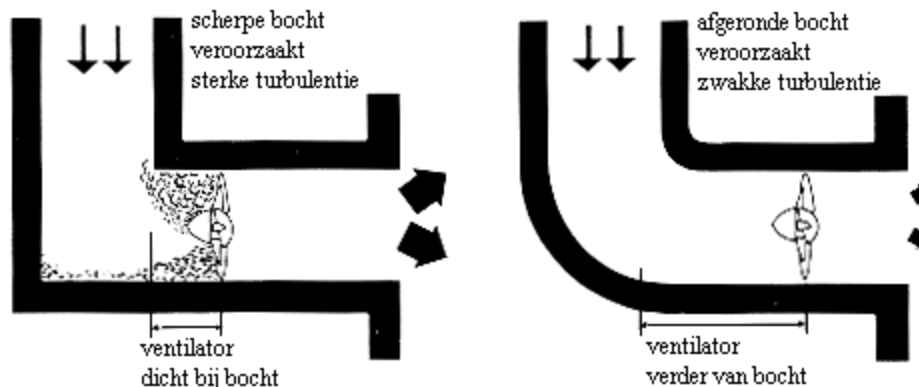
In de procesgerichte industrie komen we vaak een ander type lawaaibron tegen, waarbij niet noodzakelijk trillingen van een hard oppervlak optreden : de aërodynamische bron. Zo'n bron genereert breedbandgeluid op de plaats waar storingen bestaan veroorzaakt door turbulentie of wervels in een gas. Enkele voorbeelden :

- vlam
- jet
- ventiel
- ventilator
- luchtstroom in ventilatiekanaal

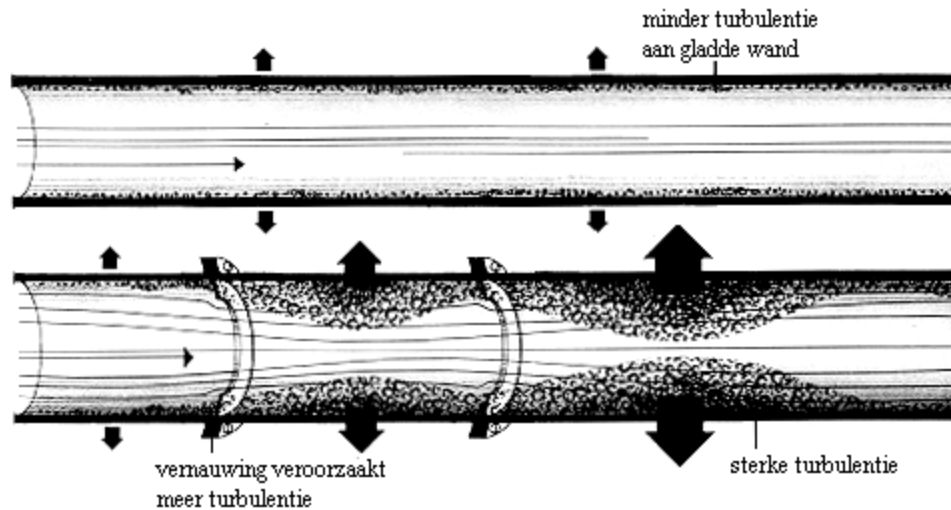
Hoe kunnen we dergelijk lawaai verhelpen?

- Het lawaai is afhankelijk van de turbulentieintensiteit, die functie is van de stromingssnelheid van het medium (gas of vloeistof). Daarom moeten alle stromingssnelheden in kanalisaties zo laag mogelijk gehouden worden door het oppervlak van de doorsnede te vergroten.
- Een grote turbulentieintensiteit door scherpe richtingswijzigingen kan vermeden worden door bij het ontwerp scherpe bochten, hindernissen en vernauwingen te elimineren waar mogelijk.

Op de figuur hieronder bemerk je een sterke turbulentie in de buurt van de scherpe bocht, waar bovendien dichtbij een ventilator is ingebouwd : het lawaai aan de uitlaat is groot. Door de bocht af te ronden neemt de turbulentieintensiteit af ; door de ventilator verder van de bocht in te bouwen heeft de zwakke turbulentie in de bocht de tijd om uit te doven.



Op de volgende figuur hieronder zie je dat een stroming steeds turbulentie veroorzaakt aan de wanden van een buis. De turbulentieintensiteit en bijgevolg het lawaai nemen wel toe in de buurt van de vernauwingen.



- Het lawaai van een jet of uitlaat kan verminderd worden door gebruik te maken van dempers.
- Het lawaai veroorzaakt door een schokgolf (b.v. ontstaan door een luchtstroomonderbreker) kan verminderd worden door gebruik te maken van een geschikte expansiekamer en dempers op het pad van die schokgolf.

6.3.3 Specificatie bij aankoop van toestellen

Als milieucoördinator of mer-deskundige heeft men meestal geen directe impact op de werking en het ontwerp van toestellen. Men moet zich beperken tot het speciëren van de toegelaten geluidemissie bij aankoop van een toestel. Hierbij bedenk je best:

- Met het oog op het garanderen van arbeidsveiligheid vraag je best garanties voor het A-gewogen geluidsdrukniveau L_{pA} op een afgesproken afstand van de bron (meestal 1m). De constructeur zal ervan uitgaan dat de geluidsbron in een 'normale' omgeving geplaatst wordt. Verwacht je veel reflecties of wil je de bron in een zeer kleine ruimte zonder absorberend materiaal onderbrengen, dan zal je daarmee rekening moeten houden. Bij de bespreking van geluid in een afgesloten ruimte zagen we immers dat het geluidsdrukniveau in dergelijke omstandigheden vele dB kan toenemen.
- Is het de bedoeling de geluidemissie in de omgeving te beperken of wil je het globale niveau afkomstig van verschillende bronnen in een werksruimte voorspellen, dan moet een garantie gevraagd worden betreffende het akoestisch vermogenniveau L_W per octaafband. Op basis van deze grootheid kan dan het geluidintensiteitsniveau berekend worden zowel bij propagatie in open lucht als bij propagatie in een afgesloten ruimte.
- Indien enkel het globale geluidsvermogenniveau gekend is, dan kan uit de literatuur een typisch spectrum voor dat type toestel overgenomen worden. Pas echter op ! Bij moeilijk te bereiken akoestische specificaties zal de constructeur dikwijls de hoge frequenties onderdrukken. Deze zijn echter net niet zeer relevant voor de geluidemissie op grotere afstand.

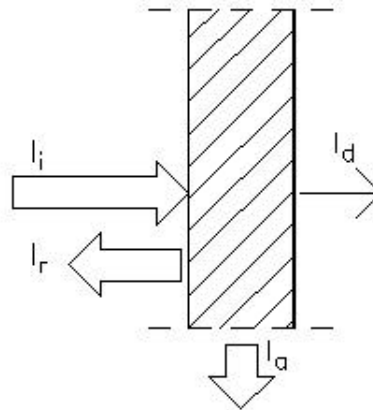
6.4 Geluidsabsorptie

6.4.1 Definitie

1. Definitie geluidsabsorptiecoëfficiënt

Bij weerkaatsing van een geluidsgolf op de begrenzings van een ruimte kan de geluidsgolf energie verliezen door demping bij de weerkaatsing. De energie van het trillende luchtdeeltje wordt omgezet in warmte door wrijving in het (absorptie-) materiaal. De geluidsabsorptiecoëfficiënt is de verhouding van de geluidintensiteit die door absorptie of transmissie het lokaal verlaat tot de geluidintensiteit die op de constructie invalt. Onderstaande figuur illustreert de energiestromen bij een wand:

I_i = intensiteit van de invallende golf
 I_r = intensiteit van de gereflecteerde golf
 I_d = intensiteit van de doorgelaten golf (transmissie)
 I_a = intensiteit van de geabsorbeerde golf



De geluidsabsorptiecoëfficiënt ziet er dus uit als volgt:

$$\alpha = \frac{I_a + I_d}{I_i}$$

I_d is in vele gevallen verwaarloosbaar ten opzichte van I_a :

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i}$$

α is dimensieloos, hoek- en frequentieafhankelijk. Ze heeft in principe een waarde tussen 0 en 1.

2. Definitie geluidsabsorptie

De geluidsabsorptie van een begrenzingsoppervlak met oppervlakte S_i is gelijk aan $S_i \alpha_i$ [m^2]. De totale absorptie van de begrenzingsoppervlakken van een ruimte is:

$$A = \sum \alpha_i S_i \text{ [} m^2 \text{]}$$

Omdat men aan een raam een α -waarde gelijk aan 1 kan toekennen, wordt als eenheid van de geluidsabsorptie soms ook gesproken van m^2 O.R., d.i. m^2 open raam equivalent. De totale absorptie is bepalend voor de nagalmtijd (zie ook formule van Sabine).



6.4.2 Mechanismes

We bekijken eerst de [algemeenheden](#), vooraleer we overgaan tot de bespreking van de verschillende absorptiemechanismen.

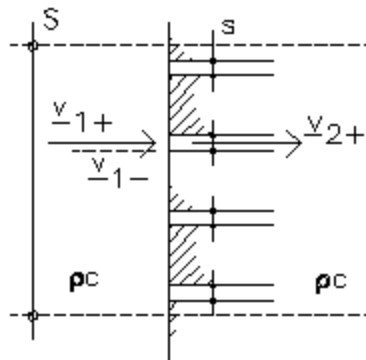
We onderscheiden drie absorptiemechanismen:

1. Poreuze absorberende materialen
2. Helmholtz- of holteresnantieabsorptie
3. Paneelabsorptie

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.4.2.1 Poreuze absorberende materialen

Poreuze materialen kunnen een goede geluidsabsorptie opleveren wanneer de porositeit voldoende hoog is. Voor poreuze stoffen kunnen we als eenvoudigste voorstelling het Rayleigh-model aanwenden. De porositeit wordt dan ingevoerd onder de vorm van parallelle buisjes die loodrecht op het grensvlak staan.



s = totale sectie van de buisjes in de aangeduide zone met oppervlakte S

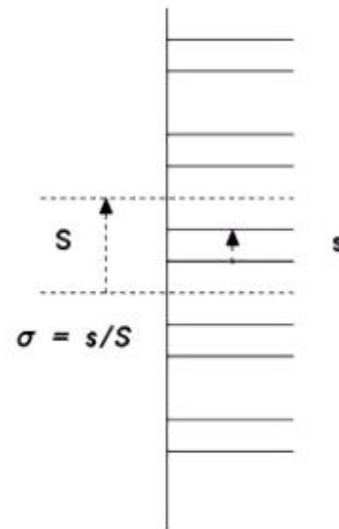
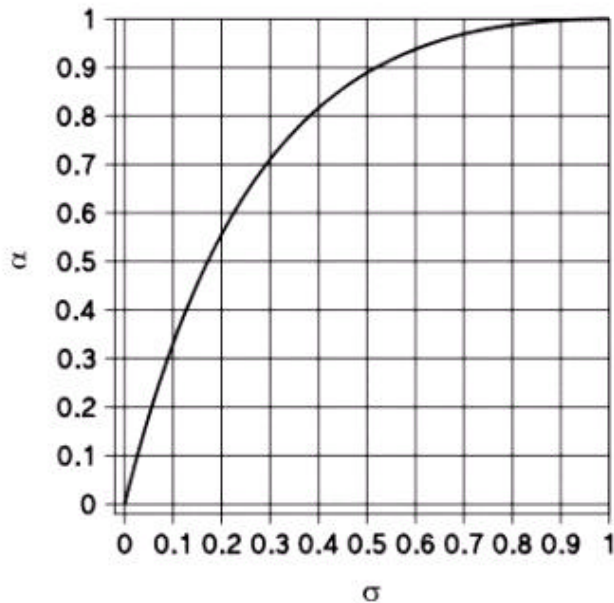
De porositeit σ van het materiaal is te bepalen als de verhouding van de secties:

$$\sigma = \frac{s}{S}$$

Uit de continuïteitsvoorwaarden aan de overgang tussen de lucht en het absorberend materiaal bepalen we het verband tussen de absorptiecoëfficiënt α en de porositeit σ .

$$\alpha = \frac{4\sigma}{(1 + \sigma)^2}$$

Grafisch ziet deze formule eruit zoals hieronder afgebeeld.



Het is duidelijk dat wanneer de porositeit de waarde 1 nadert, de absorptiecoëfficiënt in de buurt komt van de waarde 1. Het absorptiemateriaal benadert op dat moment een open raam. In werkelijkheid moeten we rekening houden met de vorm en structuur van de poriën in plaats van het eenvoudige Rayleigh-model en met de wrijving in de 'kanaaltjes'. De formulering voor de absorptiecoëfficiënt wordt dan niet meer zo eenvoudig.

Bijzonderheden

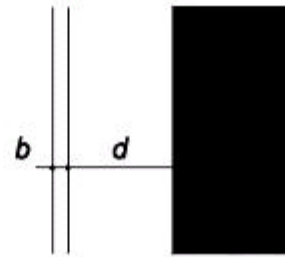
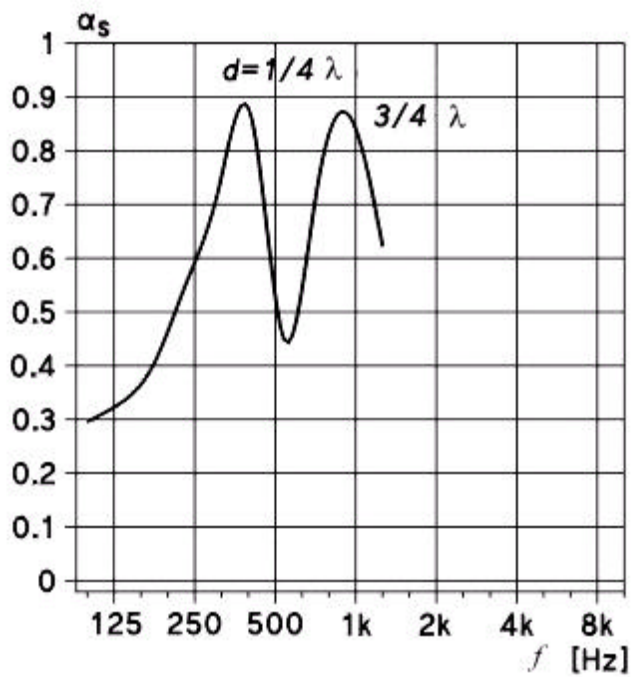
We kunnen een geluidsabsorberend materiaal aanbrengen op een afstand d voor een harde achterwand. Bij reflectie van een vlakke golf op een akoestisch harde wand (op $x = 0$) berekenen we dat de druk en de snelheid te bepalen zijn als



$$\begin{aligned} p &= 2p_+ \cos(kx) \\ v &= 2v_+ \sin(kx) \end{aligned}$$

Hieruit leiden we af dat op de posities x_d die een oneven veelvoud zijn van $l/4$, de druk nul en de deeltjessnelheid maximaal wordt. Door een absorberend materiaal te plaatsen op één van deze posities x_d zal de geabsorbeerde energie voor de bijhorende frequentie maximaal zijn.

Het verloop van de absorptiecoëfficiënt in functie van de frequentie ziet er dan als volgt uit:



© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

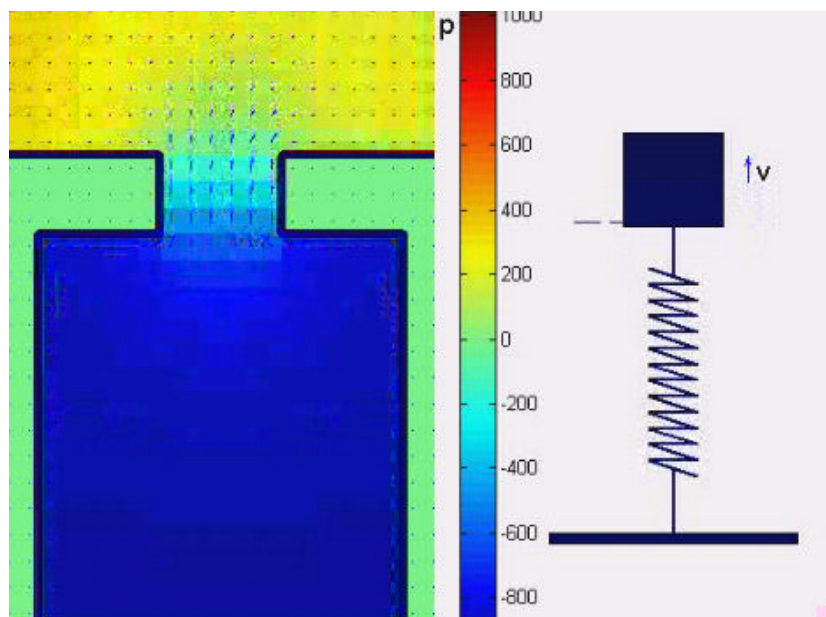
6.4.2.2 Helmholtzresonatoren

6.4.2.2.1 Resonantiefrequentie

De analogie met een massa-veer-systeem



Het gedrag van een verliesloze Helmholtzresonator is analoog aan andere elementaire resonatoren zoals een massa-veer-systeem of een elektrisch netwerk met een inductiespoel en een capaciteit. De analogie met een massa-veer-systeem is fysisch eenvoudig in te zien aan de hand van het videofragment.



In de video wordt de geluidsdruk en deeltjessnelheid in een resonerende rechthoekige resonator vergeleken met het gedrag van een analoog massa-veersysteem. De tijdsevolutie wordt gevolgd in een doorsnede van de resonator gedurende één periode van de resonatiefrequentie.

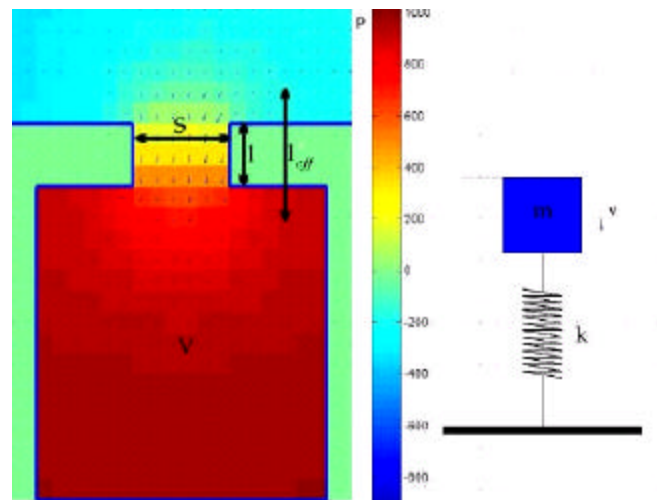
Bestudeer eerst de resonator. Zowel de geluidsdruk als de deeltjessnelheid worden weergegeven in een doorsnede. De deeltjessnelheid wordt weergegeven door de pijltjes en de geluidsdruk distributie door de kleur. Hoge positieve drukken zijn rood, de grote negatieve drukken zijn blauw. Controleer op de video dat

- de significante deeltjessnelheden vooral optreden in de omgeving van de resonatorhals;
- de geluidsdruk toeneemt in het resonatorvolume wanneer de luchtmasa van de hals in het resonatorvolume stroomt;
- en de geluidsdruk afneemt in het resonatorvolume wanneer de luchtmasa van de hals naar buiten vloeit.

Hieruit kan men besluiten dat de luchtmasa in de resonatorhals heen en weer trilt met als drijvende kracht het samendrukken en expanderen van het gas in het resonatorvolume. Dit is analoog aan de werking van een verliesloos massa-veer-systeem. De veer wordt samengedrukt door de massa die naar beneden komt. Door de toenemende opwaartse kracht van de veer op de massa vermindert de snelheid van de massa, komt ze tot stilstand en begint ze met een toenemende snelheid naar boven te bewegen. Als de massa voorbij het evenwichtspunt komt, wordt de veer uitgerokken en oefent van dan af een neerwaartse kracht uit op de massa. Deze zal op haar beurt de massa tot stilstand brengen en haar weer naar beneden doen versnellen.

In onderstaande figuur worden de belangrijkste kwantitatieve parameters van de resonator voorgesteld. Men onderscheidt:

- l als de lengte van de resonatorhals;
- S als de oppervlakte van een sectie doorheen resonatorhals;
- V als het volume van de resonator.



De analogie tussen de Helmholtzresonator en het massa-veer systeem wordt weergegeven in de onderstaande tabel.

Helmholtzresonator	massa-veer systeem
de luchtmassa in de resonatorhals ($= \rho l' S$)	de massa ($= m$)
de veerconstante van de luchtmassa in het volume ($= \rho c^2 S^2 / V$)	de veerconstante ($= k$)
de krachtwerking van de over- en onderdruk in het volume op de luchtmassa in de resonatorhals	de krachtwerking van de veer op de massa
de gemiddelde verplaatsing van de luchtmassa in de flessenhals	de verplaatsing van de massa
de gemiddelde akoestische snelheid van de lucht in de resonatorhals	de snelheid van de massa ($= v$)

(ρ staat voor de dichtheid van lucht en c voor de snelheid van het geluid)

Bemerk dat de massa van de Helmholtzresonator niet enkel bestaat uit de massa van de luchtmassa in de resonatorhals (zijnde $\rho l' S$) maar eveneens bijdragen bevat uit het instroom- en uitstroomgebied van de resonatorhals. Deze bijdragen zitten gevat in de effectieve lengte l_{eff} van de resonatorhals. Het verschil tussen beide hangt af van de vorm van de resonatorhals. Voor een cilindervormige resonatorhals met straal a kan men bewijzen dat :

$$l_{eff} = l + \frac{16a}{3\pi}.$$

Voor de verklaring van de resonatorwerking wordt nergens een beroep gedaan op golfphenomenen. Dit hangt samen met het feit dat een Helmholtzresonator klein is ten opzichte van de golflengte die correspondeert met zijn resonantiefrequentie. Hierdoor treden de effecten eigen aan het golfkarakter niet expliciet op.

De resonantiefrequentie van een verliesloze resonator

Wanneer een geluidimpuls wordt aangelegd aan de ingang van een Helmholtzresonator zal deze natrillen met de resonantiefrequentie. Deze resonantiefrequentie hangt naar analogie met het massa-veersysteem af van de grootte van de luchtmassa in de resonatorhals en de stijfheid van de luchtmassa in het volume en wordt gegeven door

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

Op basis van deze analogie kan men de resonantiefrequentie berekenen in functie van de belangrijkste parameters van een Helmholtzresonator.

Dit resulteert in

$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_{eff} V}}.$$

Met behulp van deze relatie kan men een resonator optimaliseren voor specifieke toepassingen.

Opdrachten



In [de experimenteer ruimte](#) kan men de afhankelijkheid van de resonatiefrequentie voor de verschillende parameters grondig bestuderen. Gebruik hiervoor de geïsoleerde resonatorconfiguratie en bestudeer het amplitudespectrum van p_i / p_o . De resonatiefrequentie vindt men terug op het maximum van het spectrum.

- Controleer de afhankelijkheid van deze frequentie voor de verschillende parameters van de resonator.
- Bereken de golflengte die bij de resonantiefrequentie hoort en vergelijk die met de dimensies van de resonator.
- Bestudeer of de resonatiefrequentie afhangt van verliesmechanismen in de resonator (R en v).

© INTEC, Universiteit Gent

6.4.2.2 Absorptie

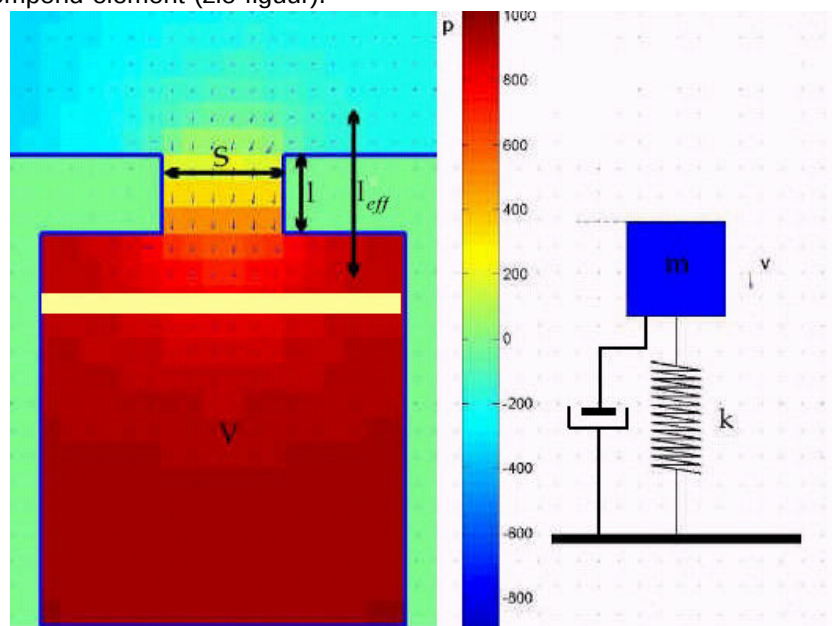
Helmholtz resonator vervaardigd uit hard materiaal



Wanneer men het verloop van de [deeltjessnelheid in de resonator](#) bekijkt bij de resonantiefrequentie, dan valt een sterke toename van deze snelheid in de hals van de resonator op. De wrijvingskrachten langs een hard voorwerp ten gevolge van viscositeit van het fluïdum zijn zeer klein voor gassen. Door de sterke toename van de snelheid in de hals van de Helmholtzresonator zullen deze krachten echter voor een belangrijke omzetting van kinetische energie naar warmte zorgen. Dit verliesmechanisme verklaart de absorptie van geluid in een Helmholtzresonator vervaardigd uit harde materialen.

Helmholtzresonator met poreus materiaal

Door poreus materiaal aan te brengen in de resonator wordt bijkomende wrijving teweeggebracht. In het equivalent massa-veer systeem komt dit overeen met het toevoegen van een dempend element (zie figuur).



Het effect van het materiaal is groter naarmate het dichter bij de hals van de resonator aangebracht wordt. Wanneer het materiaal dadelijk tegen de hals aangebracht wordt, dan zal het de luchtstroming zodanig beïnvloeden dat de effectieve lengte moet aangepast worden bij de berekening van de resonantiefrequentie.

Poreuze materialen worden in eerste instantie gekenmerkt door hun stromingsweerstand. Om het effect van poreuze materialen in een Helmholtzresonator te beschrijven, kan gebruik gemaakt worden van de effectieve stromingsweerstand R , die de dikte van het materiaal en de positie in het resonatorvolume in rekening brengt.

Test nu de absorptiemechanismen in de experimenteerruimte

Om de absorptiemechanismen te bestuderen, wordt de experimenteerruimte in de toestand "geïsoleerde resonator" en "energieabsorptiecoëfficiënt" geplaatst. Volgende experimenten geven een goed beeld van het effect van absorptie in de Helmholtzresonator.

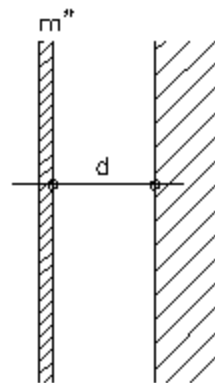
- Wat gebeurt er met de energieabsorptiecoëfficiënt als de luchtviscositeit (μ) gelijk aan nul wordt verondersteld en er geen poreus materiaal aanwezig is ($R=0$)?
- Geef voor S_i de maximale waarde, namelijk 1 m in. Dat wil zeggen dat de resonator in een grote vlakke wand geplaatst wordt. Kies l , a en V zodanig dat de resonator bij 300 Hz resoneert en een zo kort mogelijke hals heeft. Wat gebeurt er als absorberend materiaal met toenemende R in de resonator wordt gebracht?
- Kies l , a en V zodanig dat de resonator bij 300 Hz resoneert, maar nu een zo lang mogelijke hals heeft. Wat gebeurt er als absorberend materiaal met toenemende R in de resonator wordt gebracht?
- Verklein S_i nu tot enkele malen de straal van de hals van de resonator, a . Ga voor een aantal combinaties van l en V na wat er gebeurt als absorberend materiaal met toenemende R in de resonator wordt gebracht.

© INTEC, Universiteit Gent

6.4.2.3 Paneelabsorptie

We spreken van paneelabsorptie als we een licht paneel aanbrengen voor een wand. Het absorptieprincipe berust dan op de resonantie van het (licht) paneel met massa m'' op een achterliggende luchtlaag. Deze luchtlaag kunnen we beschouwen als een veer. De veerstijfheid wordt dan bepaald

door de volgende formule: $s'' = \frac{K}{d}$,
 waarbij K de volumestijfheid ($= c^2 \rho_0$) van de luchtlaag is en d de dikte van de laag.



Verder weten we dat de resonantiefrequentie als volgt uit de veerstijfheid bepaald kan worden:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{\frac{s''}{m''}} = \sqrt{\frac{K}{m''d}} \\ &= \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{m''d}} \end{aligned} \quad \text{en dus:} \quad \begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{m''d}} \\ &= \frac{60}{\sqrt{m''d}} \end{aligned}$$

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.4.3 Meten van geluidsabsorptie

Voor het bepalen van de absorptiecoëfficiënt bestaan er twee werkwijzen: de buismethode en de nagalmkamermethode. De resultaten kunnen verschillen afhankelijk van de gebruikte meetmethode. De buismethode heeft namelijk betrekking op een loodrecht invallende geluidsgolf op een klein monster, de galmkamermethode op de alzijdige geluidinval op een groot monster.

1. Buismethode: loodrechte inval
2. Galmkamermethode: alzijdige inval

© Labo Bouwfysica, K.U.Leuven

6.4.3.1 Buismethode: loodrechte inval

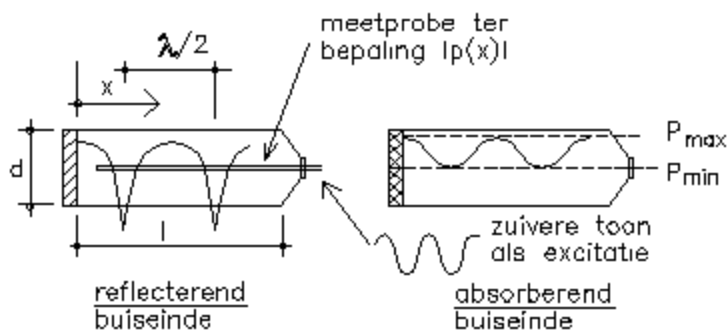
We plaatsen een klein proefmonster aan het uiteinde van een buis, loodrecht op de aslijn van de buis. Aan het andere buiseinde veroorzaakt een luidspreker een akoestische golf. De geluidinval op het monster is loodrecht.

De absorptie-eigenschappen van het monster worden afgeleid uit de opmeting van de geluidsdruk in functie van de plaats in de buis.

Gebruikelijke methode:

We wekken een zuivere toon op aan de luidspreker.

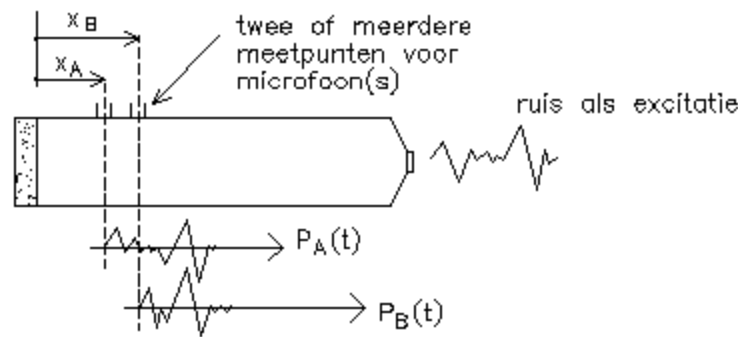
Vervolgens meten we het amplitudo van de akoestische druk in functie van de afstand tot het oppervlak van het proefmonster.



Recente werkwijze:

We maken nu gebruik van een breedbandig excitatiesignaal (ruis).

We registreren de geluidsdruk op twee microfoonplaatsen A en B.



© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.4.3.2 Galmkammermethode: alzijdige inval

De galmkamer is een ruimte met harde, niet-evenwijdige oppervlakken, dit laatste met de bedoeling een diffuus geluidveld te creëren. Voor architecturaal ontwerp wordt meestal gebruik gemaakt van absorptiecoëfficiënten, bepaald aan de hand van deze methode.

De methode bestaat erin eerst de nagalmtijd van de ruimte zonder monster te bepalen en vervolgens de meting te herhalen met aanwezigheid van het monster. Aan de hand van de formule van Sabine kunnen we dan de absorptiecoëfficiënt bepalen als volgt:

$$\alpha_s = \frac{0,16 V}{S} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

met V het volume van de galmkamer [m³]

S de oppervlakte van het proefmonster [m²]

T2 de nagalmtijd in de galmkamer met monster [s]

T1 de nagalmtijd in de galmkamer zonder monster [s].



Beperkingen

Net zoals de buismethode heeft deze methode haar beperkingen. De galmkamer moet een voldoende diffusiviteit hebben. Door de ruimte een onregelmatige vorm te geven die afwijkt van een balkvorm en door evenwijdige wanden te vermijden, bekomen we een “onregelmatige” verdeling van de eigenmoden.

Verder moet de nagalmtijd voldoende lang zijn. De wanden moeten dus sterk reflecterend zijn en het volume van de ruimte voldoende groot.

Om zo weinig mogelijk last te hebben van randeffecten mag het monster niet te klein zijn.

Aangezien aan deze voorwaarden niet steeds is voldaan, zijn as-waarden groter dan 1 niet onmogelijk.

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.4.4 Toepassingen: reductie reverberant geluidveld

Het geluidsniveau in een gesloten ruimte is gegeven door :

$$L_p = L_{\text{br}} + 10 \log \left(\frac{F}{4\pi R^2} + \frac{4}{Z_k} \right)$$

De bijdrage van het direct geluidveld (vrije veld) in het totale geluidsniveau is enkel te verlagen door het vermogen van de bron te verlagen. De bijdrage van het indirecte geluidveld (reverberant veld), die de grootste bijdrage wordt op grote afstand, blijkt ook te verlagen door de zaalconstante Z_k , of dus de totale absorptie van de zaal te verhogen.

De reductie van het geluidsdrukkniveau ΔL_p door het verhogen van de zaalconstante van Z_{k1} naar Z_{k2} is bij verwaarlozing van het directe veld, gegeven door:

$$\begin{aligned} \Delta L_p &= L_{p1} - L_{p2} \\ &= L_{\text{bron}} + 10 \log \frac{4}{Z_{k1}} - L_{\text{bron}} - 10 \log \frac{4}{Z_{k2}} \\ &= 10 \log \frac{Z_{k2}}{Z_{k1}} \end{aligned}$$

Als men er bijvoorbeeld in slaagt de zaalconstante van 200 m^2 naar 2000 m^2 op te drijven, dan bekomt men vermindering van het reverberant niveau met 10 dB. De waarnemer moet zich echter op minstens 20 meter van de bron bevinden om zich bij deze Z_k waarde in een zuiver reverberant veld te bevinden. Op kortere afstand wordt het directe (vrije) veld dominant.

Door het bronvermogen van de aanwezige geluidsbronnen te beperken wordt zowel het directe als het reverberant geluidveld gereduceerd, wat dus heel efficiënt is. Het directe geluidveld kan ook gereduceerd worden door het gebruik van geluidsschermen, doch hierbij moet men bijzondere aandacht besteden aan de reflectie-eigenschappen van de zoldering. Indien de zoldering boven het geluidsscherm niet voldoende absorberend is, dan zal het effect van het scherm in grote mate te niet gedaan worden door geluidsgolven die van bron naar ontvanger propageren via een reflectie op die zoldering.

© INTEC, Universiteit Gent

6.5 Geluiddempers op buizen

In vele industriële en bouwkundige situaties propageert het geluid eerst een tijdje door een buis en komt pas later in de omgeving terecht. Voorbeelden zijn: in- en uitlaten van verbrandingssystemen, koelopeningen met ventilatoren en luchtconditioneringssystemen. Het is meestal zeer efficiënt om het geluid te absorberen of te reflecteren tijdens deze propagatie door een buis. Men gebruikt hiervoor geluiddempers. Men kan naar hun werking drie types onderscheiden, hoewel dikwijls combinaties van verschillende werkingsprincipes voorkomen.

De performantie van een geluiddemper wordt beschreven door het introductieverlies IL gedefinieerd als:

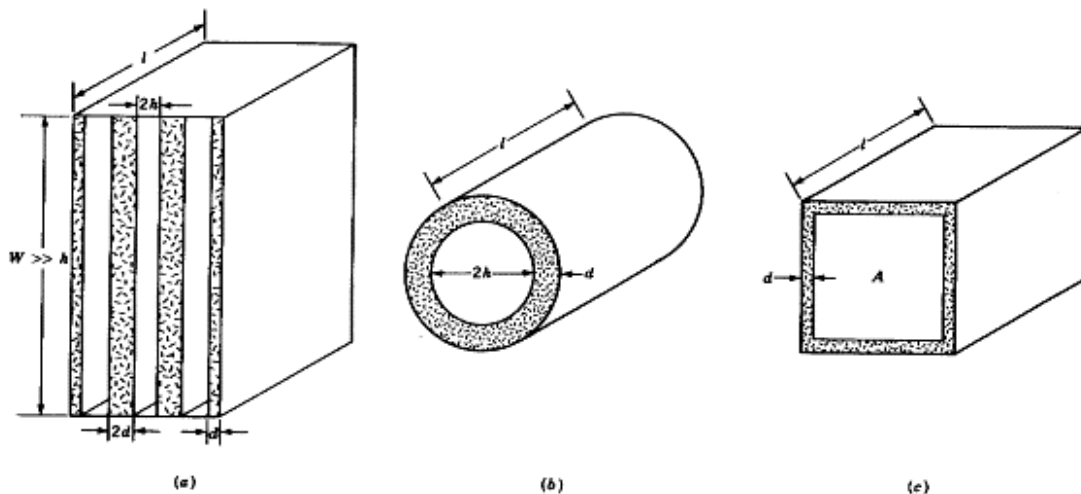
$$IL = 10 \log \left(\frac{W_0}{W_M} \right)$$

waarbij W_0 en W_M het geluidsvermogen uitgestraald aan het uiteinde van de leiding zonder en met de geluiddemper. Als er een gas doorstroomt, is daarnaast ook de statische drukval over de geluiddemper belangrijk. De statische drukval zal immers dikwijls het rendement van het toestel dat zich voor de demper bevindt, verlagen (voorbeeld: de knaldemper op een motorfiets).

© INTEC, Universiteit Gent

6.5.1 Dissipatief

Door absorberend materiaal in een buis aan te brengen maakt men een dissipatieve geluiddemper. De term dissipatief wijst op de bijna volledige omzetting van invallende akoestische energie in warmte. Om de vrije doorstroomopening voldoende groot te houden zal men dikwijls de buis verbreden ter hoogte van de demper, en zelfs van een ronde naar een rechthoekige doorsnede overgaan. Onderstaande figuur toont hoe het absorberend materiaal in de buis aangebracht kan zijn.



De parallelle baffelstructuur (a) is zeer populair wegens zijn goede performantie en lage kostprijs. Bij deze structuur zorgt de smalle doorgang tussen de baffels ervoor dat geen geluidsgolven met hoge frequentie door de geluiddemper propageren zonder met het absorberend materiaal te interageren. Kwantitatief kan men stellen dat $2h < \lambda$ moet zijn opdat

er voldoende interactie zou zijn tussen een geluidsgolf en het absorberend materiaal. Anderzijds moet de geluidsgolf voldoende in de baffel doordringen. Dit is het geval als de baffel voldoende poreus is. Om IL kwantitatief te begroten moet het golfpropagatieprobleem in het gekoppeld systeem gasabsorberend materiaal opgelost worden. Zeer benaderend kan men echter stellen dat voor voldoende lange geluiddempers van het parallelle baffeltype:

$$IL = L_h \frac{\lambda}{l_2}$$

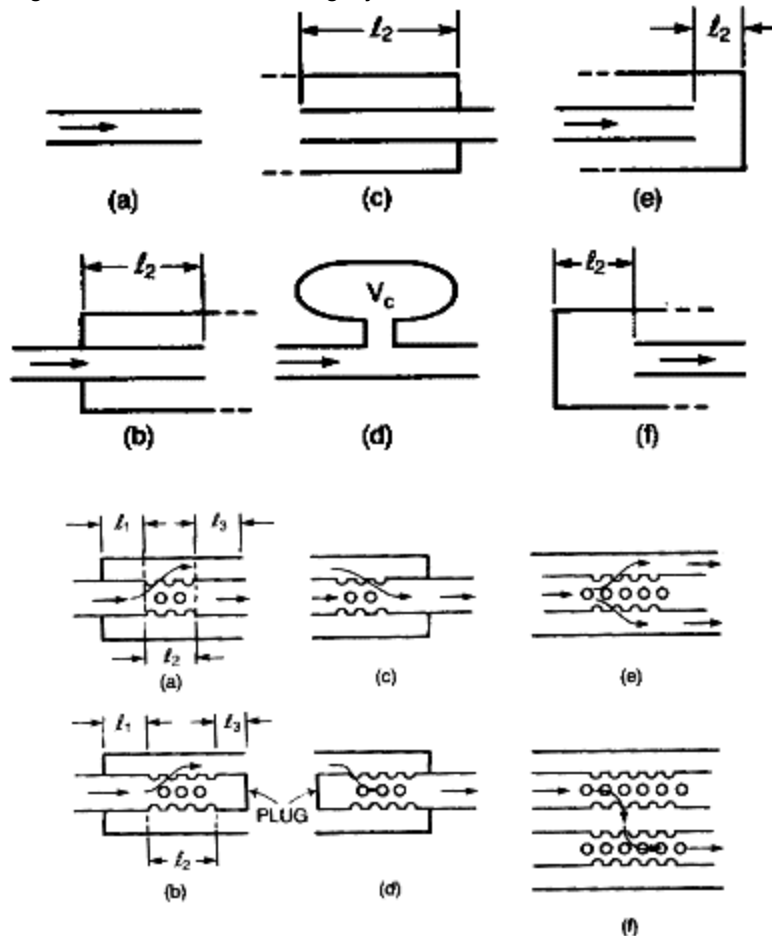


waarbij L_h volgt uit de propagatieconstante van het gekoppeld systeem. L_h bereikt een maximum van ongeveer 2 dB als $2h$ net iets kleiner is dan de golflengte voor gangbare diktes en eigenschappen van baffelmateriaal.

© INTEC, Universiteit Gent

6.5.2 Reactief

Reactieve geluiddempers realiseren een IL door het geluid terug te kaatsen naar de geluidsbron. Ze bestaan uit een opeenvolging van discontinuïteiten van de buis. Onderstaande figuur toont een aantal mogelijke bouwstenen.



Door aaneenschakeling van deze bouwstenen kan vrijwel elke gewenste frequentieafhankelijkheid van de IL gerealiseerd worden. Reactieve geluiddempers hebben het voordeel dat ze gemakkelijker afgestemd kunnen worden op specifieke (lage) frequenties en ze meestal vervaardigd kunnen worden uit materiaal dat beter bestand is tegen hitte en vochtigheid dan absorberend materiaal.

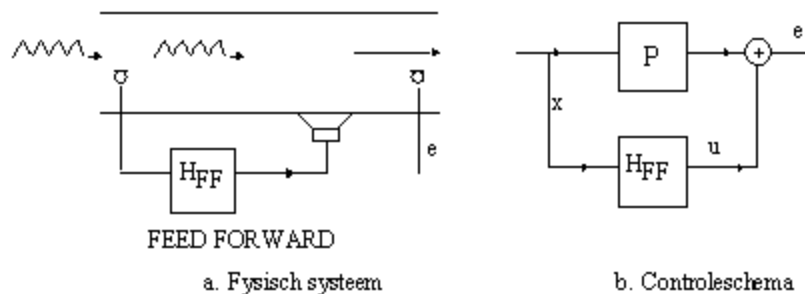
© INTEC, Universiteit Gent

6.5.3 Actief



Bij lage frequenties kan eveneens gebruik gemaakt worden van een actief systeem (anti-geluid). Hierbij wordt een geschikt geluidssignaal door een luidspreker in de buis opgewekt. Dit geluid interfereert destructief met het originele geluid met stilte als resultaat. Het probleem is echter dat daarvoor het te behandelen geluid op elk ogenblik gekend moet zijn. Men kan opteren voor, wat men in het jargon, feed forward-controle noemt.

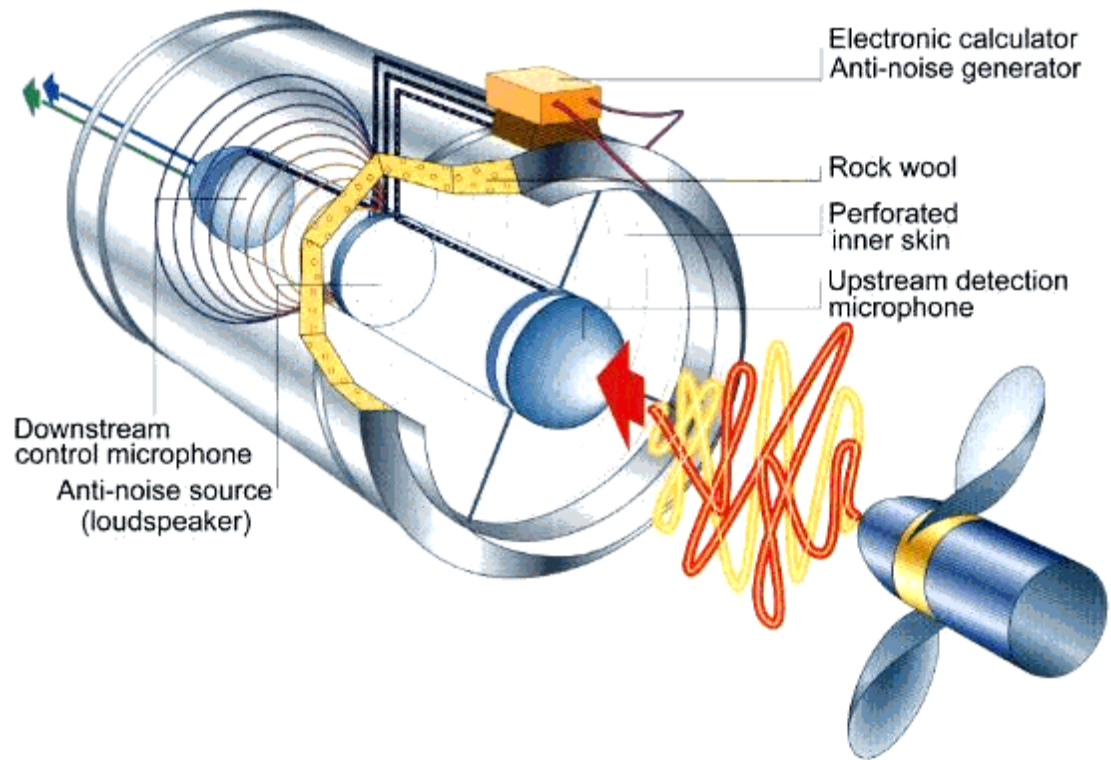
Feed forward-controle steunt op een vroege detectie van een signaal dat met het te controleren geluid gecorreleerd is. Dit referentiesignaal kan bijvoorbeeld een vroege detectie met een microfoon van een propagerend geluidssignaal in de buis zijn of een meting van de rotatiesnelheid van de geluidsbron. In het voorwaarts elektronisch pad wordt een filter H_{FF} aangebracht, dat – op het teken na – zo goed mogelijk het akoestisch pad P weergeeft. Als $H_{FF} \equiv -P$, wordt het foutsignaal $e=0$ en bekomt men perfecte stilte. In de praktijk blijkt het onmogelijk H_{FF} eens en voor altijd te ontwerpen, vermits het akoestisch pad P door diverse omstandigheden kan wijzigen. Daarom zoekt men een toevlucht in adaptieve filters.



Voorbeeld van FF-AGC systeem

Om H_{FF} aan te passen, wordt het resulterend geluidssignaal e opgemeten en door een gepast digitaal algoritme geëvalueerd. Het overblijvend geluid neemt af naarmate het algoritme convergeert.

Met actieve geluidscntrole kan een hoog introductieverlies IL bij lage frequenties gerealiseerd worden en dit zonder drukval vermits er geen discontinuïteiten in de leiding voorkomen. Nadeel is echter dat elektronische apparatuur, microfoons en luidsprekers onvoldoende robuust zijn voor vele industriële situaties (denk bijvoorbeeld eens aan wat er zou gebeuren met een traditionele luidspreker in een uitlaatkoker waarin zich rookgassen van 400C bevinden). Onderstaande figuur geeft een commerciële implementatie, waarbij lage frequenties aangepakt worden met AGC en hoge frequenties met een dissipatieve laag 'rockwool'.



© INTEC, Universiteit Gent

6.6 Geluidsisolatie

In dit hoofdstuk bespreken we de geluidsisolatie. Wat houdt dit in ? Hoe kunnen we de geluidsisolatie becijferen ? Welke soorten geluidtransmissie bestaan er ? Wat kunnen we doen om de geluidsisolatie te verbeteren ? enz. Om overlast te verhinderen, lees je dus best aandachtig dit hoofdstuk!

Vooraleer we dieper ingaan, volgt een kort overzicht van de 'inhoud' van geluidsisolatie: bepaling van de geluidsisolatie R , soorten geluid en oorzaken.

- Soorten geluid:
 1. Contactgeluid: De constructie (gebouw, machine, ...) wordt aan het trillen gebracht door rechtstreeks contact van een voorwerp met de constructie.
 2. Luchtgeluid: De constructie wordt aan het trillen gebracht door de trillende lucht.

- Oorzaken van geluidtransmissie:

Geluidafstraling:

De wanden worden aan het trillen gebracht door een geluidsbron of welke trillingsbron dan ook, en gaan aan de beide zijden van de wand geluid afstralen.

Luchtlekken:

bv. ventilatieopeningen, kieren aan deuren en ramen, ...

Overlangstransmissie via verlaagde plafonds:

Indien geen speciale voorzieningen worden getroffen, kan geluid zich via het plenum gemakkelijk verplaatsen van de ene ruimte naar de andere.

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.6.1 Luchtgeluidsisolatie

Met **luchtgeluid** bedoelen we geluidsgolven opgewekt door één of andere geluidsbron in de beschouwde ruimte die de omringende lucht in trilling brengt. Er bestaat geen rechtstreeks contact tussen de geluidsbron en de scheidende muren. Luchtgeluidsisolatie is dus de geluidsisolatie t.o.v. excitatie van scheidende wanden door geluidsgolven, waarbij er **geen mechanische excitatie** van de wanden optreedt. Een radio of tv-toestel, gesprekken... zijn daarom bronnen van luchtgeluid. Voetstappen, dichtslaande deuren, schuivende stoelen, stromend water in de leidingen zijn bronnen van [contactgeluid](#).

De overdracht van luchtgeluid van de ene ruimte naar de andere is te dus te beschrijven als: bron - lucht - constructie - lucht.

Bepaling:

De geluidsisolatie R wordt bepaald, uitgaande van de transmissiecoëfficiënt t van een scheidingswand. De transmissiecoëfficiënt t is gelijk aan de verhouding van het geluidsvermogen dat door een constructie wordt doorgelaten naar het ontvanglokaal (W_d) tot het geluidsvermogen dat aan de zenzijde op de constructie invalt (W_i).

$$\tau = \frac{W_d}{W_i}$$

De geluidsisolatie is dan gelijk aan

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

R is hoek- en frequentie-afhankelijk en is een eigenschap van de wand.

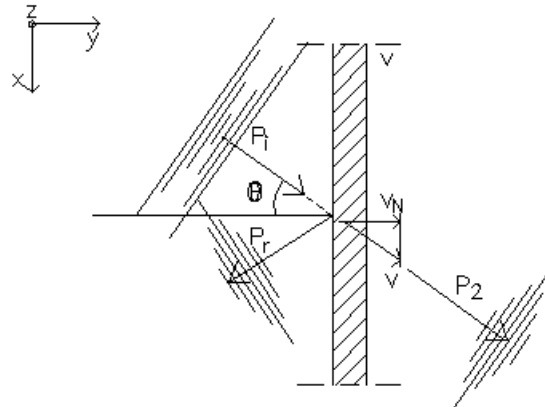
© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.6.1.1 Mechanismen

6.6.1.1.1 Wanden zonder buigstijfheid

De plaat beweegt op en neer zoals een zuiger.

p_i = de invallende golf
 p_r = de gereflecteerde golf
 p_1 = de totale druk aan de zenzijde = $p_i + p_r$
 p_2 = de doorgelaten golf (= totale druk aan de ontvangzijde)
 v = snelheid van de wand



Wanneer een lichaam trilt, is de snelheid van de direct aangrenzende luchtdeeltjes gelijk met die van het lichaam. Indien een vlak lichaam afmetingen heeft die veel groter zijn dan λ en over het gehele oppervlak met gelijke fase en amplitude trilt, ontstaat vlakbij het lichaam een geluidveld van vlakke lopende golven. Wanneer dus een vlakke golf invalt op de wand, zal gezien de wand als een zuiger beweegt en alle punten van de wand in fase en met gelijke amplitude trillen aan de andere zijde van de wand opnieuw een vlakke golf ontstaan.

Massawet



Beschouwen we een geluidsgolf die loodrecht ($\theta = 0$) op de beschouwde wand invalt, dan leiden we af, uitgaande van het dynamisch evenwicht en de continuïteitsvereisten, dat de geluidsisolatie van de wand gegeven wordt door:

$$R = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau} = 10 \cdot \log \left(1 + \left[\frac{\omega m''}{2Z} \right]^2 \right)$$

De volgende benadering wordt aanvaard:

$$R = 20 \cdot \log \frac{\omega m''}{2Z}$$

Schuine inval



Bij schuine inval van de geluidsgolf op de wand (willekeurige hoek q) moeten we rekening houden met de hoek waaronder de golf op de wand invalt.

De geluidsisolatie wordt in dat geval:

$$R = 10 \cdot \log \left\{ 1 + \left[\frac{\omega m'' \cos \theta}{2Z} \right]^2 \right\} \approx 20 \cdot \log \frac{\omega m'' \cos \theta}{2Z}$$

Alzijdige inval



Middelen we de bovenstaande formule over alle mogelijke invalshoeken, dan wordt de geluidsisolatie:

$$R_{alz} \approx R_0 - 5$$



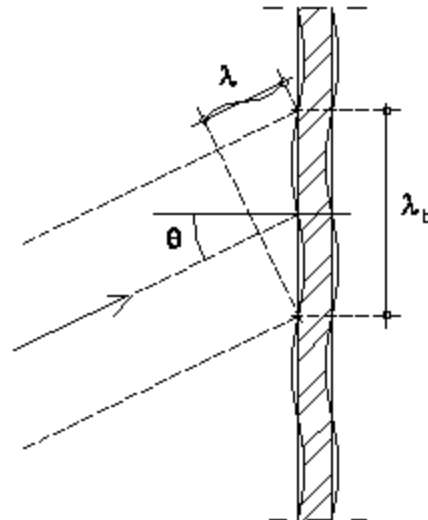
Hoe beïnvloeden de verschillende parameters van deze vergelijkingen het verloop van de geluidsisolatie? Bekijk dit eventueel in een grafiek zodat je de verschillen gemakkelijker kan waarnemen.

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.6.1.1.2 Wanden met buigstijfheid

We veronderstellen vlakke golven die invallen op een wand met buigstijfheid. Door de dynamische vervorming ontstaat op de plaat een buiggolf.

l = golflengte van de invallende golf.
 l_b = golflengte van de buiggolf op de plaat.
 q = invalshoek van de geluidsgolf.



Schuine vlakke golf invallend op een wand met buigstijfheid



Opnieuw kunnen we uit het dynamisch evenwicht de geluidsisolatie afleiden.

$$R = 10 \cdot \log \left\{ 1 + \left(\frac{\omega m'' \cos \theta}{2Z} \cdot \left[1 - \left(\frac{c_F \sin \theta}{c} \right)^4 \right] \right)^2 \right\}$$

De weerstand van de muur valt weg wanneer

$$c_B = \frac{c}{\sin \theta}$$

Geometrisch betekent dit dat het 'spoor' van de invallende golf op de plaat zich voortplant met de voortplantingssnelheid van een zich vrij voortplantende buiggolf bij dezelfde frequentie. Dit fenomeen noemt men **coïncidentie** of spooraanpassing. De laagste frequentie waarbij het fenomeen zich kan voordoen, noemt men de grensfrequentie. Dan is $c = c_B$.

In combinatie met de uitdrukking voor de voortplantingssnelheid van de buiggolf op de plaat c_B , berekent men de grensfrequentie dan als:

$$f_{gr} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}}$$

B is de buigstijfheid en is gelijk aan:

$$B = \frac{EI}{12(1 - \mu^2)}$$

m' is het gewicht per lengte-eenheid.

Het product van de grensfrequentie met de dikte van de wand blijkt na vereenvoudiging enkel af te hangen van de materiaalconstanten r_p , E en m . Het kan als volgt geschreven worden:

$$f_{gr} h \approx \frac{64000}{c_L}$$

c_L is de quasi-longitudinale golfsnelheid in de plaat:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_p(1 - \mu^2)}}$$

De geluidsisolatie blijkt sterk afhankelijk te zijn van de invalshoek. Bij scherende inval is de geluidsisolatie zelfs gelijk aan 0.

Alzijdig invallende vlakke golf op een wand met damping en buigstijfheid

De invloed van de interne damping wordt vervat in een complexe elasticiteitsmodulus $E = E(1+jh)$.

We kunnen aldus berekenen dat de geluidsisolatie voor een golf die onder een hoek q invalt op de wand, gelijk wordt aan:

$$R = 10 \cdot \log \left\{ \left[\frac{\omega m' \cos \theta}{2\rho c} \left(1 - \left[\frac{c_B \sin \theta}{c} \right]^4 \right) \right]^2 + \left[1 + \eta \frac{\omega m' \cos \theta}{2\rho c} \left[\frac{c_B \sin \theta}{c} \right]^4 \right]^2 \right\}$$

Voor het gebied boven de grensfrequentie kan men, na integratie over de invalshoeken 0° tot 80° , benaderend de volgende formule voor de alzijdige geluidsisolatie aannemen (voor $h > 0,04$ en $f > 2 f_{gr}$):

$$R_{alz} \approx R_0(f_{gr}) + 10 \cdot \log \eta + 30 \cdot \log \frac{f}{f_{gr}} - 2$$



Hoe ziet het geluidsisolatieverloop eruit? Analyseer hierbij de verschillende parameters.

Volg deze [link](#) voor enkele demo's van de deeltjesbeweging van een golf die invalt onder een bepaalde hoek op een oneindig uitgestrekte wand. Een deel van de golf wordt gereflecteerd door de wand. Een ander deel gaat door de wand heen.

Praktische methode



De prognosemethode is een benaderende methode voor het bepalen van de geluidsisolatie.

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.6.1.1.3 Illustraties



De volgende tabel bespreekt de deeltjesbewegingen aan beide zijden van een oneindig uitgestrekte wand voor een golf die invalt met een bepaalde frequentie f en onder een bepaalde hoek.

materiaal	grensfrequentie f_{gr} [Hz]	frequentie f [Hz]	Bespreking
metselwerk 14 cm	152	50	In de theorie zagen we dat de laagste frequentie waarbij coïncidentie kan optreden gelijk is aan de grensfrequentie. Bij 50 Hz kan dus onder geen enkele invalshoek coïncidentie optreden. De geluidsisolatie wordt enkel bepaald door de <u>massawet</u> . De vlakke golf die aan de ontvangzijde van de wand ontstaat, vertoont dezelfde hoek t.o.v. de normale van de wand als de invalshoek van de invallende golf. Het aandeel van de massawet overweegt t.o.v. de geluidafstraling.
metselwerk 14 cm	152	152	We krijgen coïncidentie indien de geluidsgolf <u>scherend</u> invalt op de wand. De geluidstransmissie is dan zeer groot. Wanneer echter een geluidsgolf met deze frequentie onder een schuine hoek invalt t.o.v. de wand, treedt er geen coïncidentie op. De afstraling vanwege de trillende wand is bepalend voor de geluidsisolatie.
metselwerk 14 cm	152	500	Om <u>coïncidentie</u> te kunnen krijgen, moet de geluidsgolf invallen onder een hoek $q = 33^\circ$. Op dat moment is er spooraanpassing mogelijk tussen de invallende geluidsgolf en de buiggolf op de plaat. Indien de golf invalt onder een andere hoek, zal er geen coïncidentie optreden. De deeltjes aan de ontvangzijde bewegen dan ook veel minder heftig dan in het geval van coïncidentie. De geluidsisolatie is dus ook veel hoger. Bij deze frequentie is de geluidafstraling van de wand bepalend voor de geluidstransmissie. De massawet is te verwaarlozen t.o.v. de geluidafstraling. We merken op dat de invallende golf gereflecteerd wordt op de plaat. Daardoor krijgen we een ruitjespatroon te zien aan de invalskant.
hout 10 cm	250	500	Dezelfde bemerkingen als voor metselwerk bij excitatie door een geluidsgolf met frequentie 500 Hz: <u>demo coïncidentie</u> : de golf moet juist invallen onder een hoek $\theta = 46^\circ$.

© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.6.1.1.4 Resonanties bij lage frequenties

Wanden of delen van wanden met afmetingen die niet veel groter zijn dan de geluidsgolflengte, kunnen bij welbepaalde frequenties resoneren. Dit fenomeen is belangrijk voor bijvoorbeeld ramen of voor metalen omkastingen en cabines van allerlei voertuigen. Bij de resonantiefrequentie gaat de wand heftig trillen, wat bij gepaste materiaaleigenschappen aanleiding kan geven tot sterke transmissie van geluid naar de andere zijde van de wand. De frequenties waarbij resonanties optreden zijn afhankelijk van de massa van de wand, zijn buigstijfheid en afmetingen en inklemming. De sterkte van de resonantie is afhankelijk van de dempende eigenschappen van de wand.

Bovenstaande bespreking van het mechanisme leidt ook dadelijk tot mogelijke maatregelen om resonanties bij belangrijke frequenties te vermijden:

- Verschuiven van de resonantiefrequentie door aanbrengen van extra massa of door de afmetingen te veranderen door opdeling van de wand door middel van starre ribben.
- Dempen van de resonantie door toevoegen van bijkomend dempend materiaal (b.v. rubber).

© INTEC, Universiteit Gent

6.6.1.2 Schatting van de geluidverzwakkingsindex

In de praktijk wordt de geluidsisolatie van enkelvoudige wanden berekend aan de hand van de prognosemethode. Bij deze methode wordt voor de bepaling van de geluidsisolatie uitgegaan van drie frequentiegebieden, nl. beneden de grensfrequentie, boven de grensfrequentie en een gebied rond de grensfrequentie.

Beneden de grensfrequentie

Bij deze frequenties beantwoordt de geluidsisolatie aan de massawet. De gedwongen golftransmissie overheerst:

$$R_I = R_0(f) - 5$$

Bij de grensfrequentie

Bij de grensfrequentie wordt de transmissie door vrije buiggolven bepalend. De geluidsisolatie neemt een spectaculaire duik naar onder ten opzichte van de massawet. We schematiseren de geluidsisolatie in dit gebied als een plateau dat we benaderend met de volgende vergelijking bepalen:

$$R_{II} = R_{\text{plateau}} = 20 \log m'' f_{gr} + 10 \log \eta - 44$$

Het plateau loopt van $\sqrt{2\eta}$ tot f_{gr} .

Praktisch stelt men echter vast dat het voorgestelde plateau te ongunstig is voor dikkere wanden. Gezien de beperktere afmetingen en de grotere buiggolflengte komt het coïncidentie-effect niet tot volledige ontplooiing. Daarom wordt voorgesteld een plateauwaarde R'_{plateau} te hanteren die hoger ligt.

Voor wanden waarvoor

$$m'' \geq 70 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2},$$

bepalen we het plateau als:

$$R'_{plateau} = R_{plateau} + 20 \log \frac{m''}{70}$$



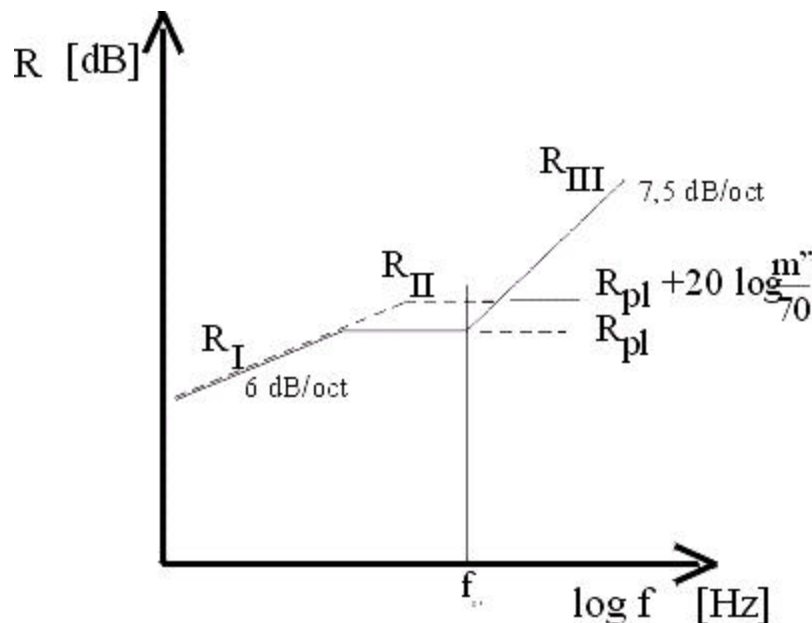
Bepaal binnen welk frequentiegebied de plateauwaarde $R'_{plateau}$ geldig is.

Boven de grensfrequentie

Zoals werd afgeleid bij wanden met buigstijfheid, blijkt de geluidsisolatie boven de grensfrequentie toe te nemen met 9 dB/octaaf. Op basis van experimentele gegevens geeft men er de voorkeur aan om de geluidsisolatie-toename te beperken tot 7,5 dB/octaaf. Dit houdt onder meer verband met het feit dat dikkere constructies niet volledig beantwoorden aan de dunne-plaat-theorie. De geluidsisolatie wordt dan gegeven door:

$$R_{III} = R_{plateau} + 25 \log \frac{f}{f_{gr}}$$

De benadering van de geluidsisolatie van een enkelvoudige wand ziet er grafisch uit als in onderstaande figuur.



© Laboratorium Bouwfysica, K.U.Leuven

6.6.1.3 Dubbele wanden

In veel gevallen is het wenselijk een hoge geluidsisolatie te realiseren met wanden met een laag gewicht. Men kan hier denken aan lichte inbouw wanden, verplaatsbare wanden, vliegtuigconstructies, ...

In dit verband worden dubbele wanden gebruikt. Deze wanden bestaan uit twee spouwbladen met ertussen een luchtlaag of een soepele tussenlaag. Met zulke constructies is het mogelijk een zeer goede geluidsisolatie te realiseren met een relatief laag gewicht.

In de veronderstelling dat we een dubbele wand realiseren die bestaat uit twee dezelfde soort platen, met eenzelfde soortelijk gewicht en eenzelfde dikte, hoe denk je dat de geluidsisolatie toeneemt?

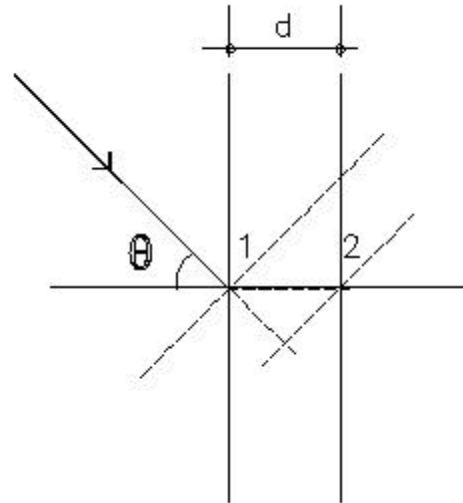
1. som van de geluidsisolatie van beide afzonderlijke wanden;
2. product van de geluidsisolatie van beide afzonderlijke wanden;
3. geen eenduidig verband.

Het model voor een dubbelewandsysteem is gesteund op het dynamisch evenwicht van twee platen, onderling verbonden door een verend systeem. In de hiernavolgende bespreking volgt een afleiding van de geluidsisolatie van dubbele wanden voor loodrechte, schuine en alzijdige inval van een vlakke geluidsgolf op de wand.

Bij de bepaling van de vergelijkingen voor de geluidsisolatie van dubbele wanden gaan we uit van dezelfde evenwichten als bij de prognosemethode voor enkele wanden. We veronderstellen daarbij dat we te doen hebben met een akoestisch dunne tussenlaag. Dit wil zeggen een tussenlaagdikte d die veel kleiner is dan de golflengte. Dit levert na vereenvoudigingen twee gebieden op waarbinnen verschillende vergelijkingen geldig zijn.

d is de dikte van de spouw [m];
 q is de invalshoek van de vlakke golf [°];
 m_1 is de massa van blad 1 [kg/m²];
 m_2 is de massa van blad 2 [kg/m²];
 De resonantiefrequentie f_0 voor dit systeem is gegeven door:

$$f_0 = \frac{60}{\cos \theta \sqrt{d}} \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}$$



$f \ll f_0(q)$



$$R = 20 \log \frac{\omega (m_1'' + m_2'') \cos \theta}{2 \rho c}$$

$f \gg f_0(q)$

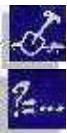
$$R = 20 \log \frac{\omega m_1'' \cos \theta}{2 \rho c} + 20 \log \frac{\omega m_2'' \cos \theta}{2 \rho c} + 20 \log \frac{2 \omega d \cos \theta}{c}$$

De maximale waarde blijkt omwille van spouwresonanties beperkt tot:

$$R = 20 \log \frac{\omega m_1'' \cos \theta}{2 \rho c} + 20 \log \frac{\omega m_2'' \cos \theta}{2 \rho c} + 6$$

De overgang tussen deze twee laatste formules blijkt voor een invalshoek van 45° gelegen bij

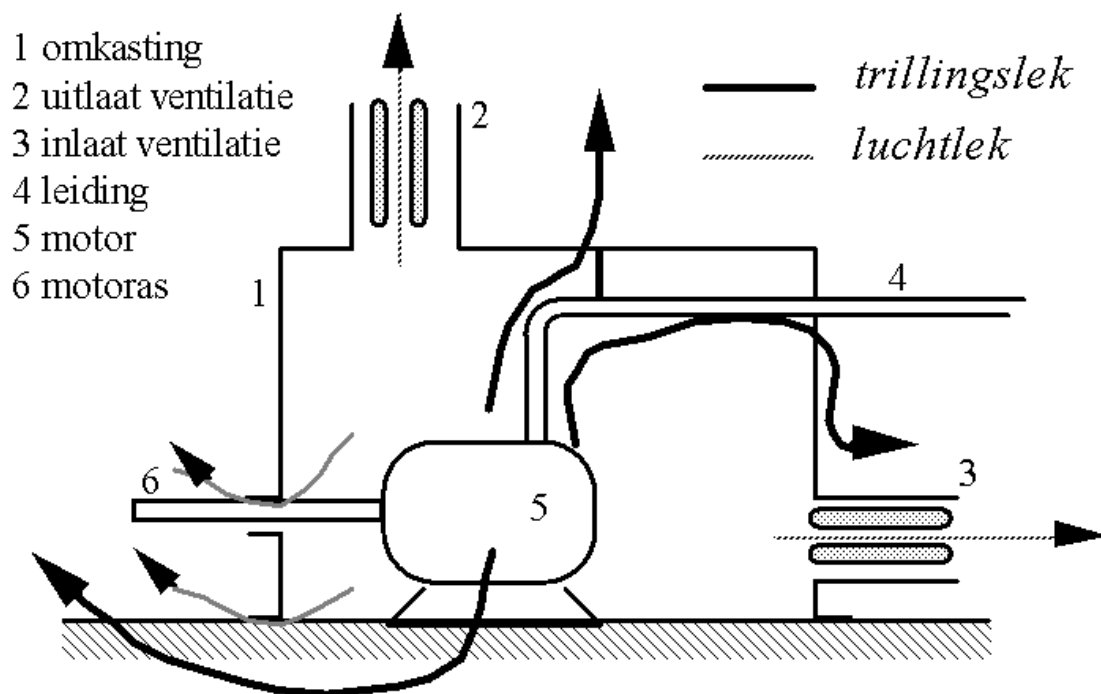
$$f = \frac{c}{4d}$$



6.6.1.4 Toepassing: omkastingen

Een veel toegepaste methode om de geluidhinder van automatisch of semi-automatisch werkende machines te reduceren is het inkapselen van de machine in een "doos" met wanden die het geluid slechts in geringe mate doorlaten. Om een goede werking te verzekeren moet de binnenkant van de doos bekleed zijn met absorberend materiaal. Als de ruimte binnen de doos immers een $Z_k=5$ heeft, dan zal het geluidsniveau in een doos van 2 m met 15 dB toenemen t.o.v. het niveau in de vrije ruimte (zie 'geluid in een afgesloten ruimte'). Zelfs als de wand het doorgelaten geluid met 30 dB verzwakt, dan nog zal de totale verlaging van het geluidsniveau door het aanbrengen van de doos slechts 15 dB zijn. Is de doos echter bekleed met absorberend materiaal, zodat $Z_k=1000$, dan zal de verlaging van het geluidsniveau door het aanbrengen van de doos effectief 30 dB bedragen.

Praktische uitvoeringen van de geluidsisolatiendoos kunnen doorzichtige delen bevatten om de machine gade te kunnen slaan ; er kunnen ook openingen voor afkoeling en verluchting van het toestel aanwezig zijn. Deze openingen moeten akoestisch zorgvuldig afgewerkt worden, bijvoorbeeld met een demper (zie onderstaande figuur). Bovendien moet men opletten dat er naast lekken voor luchtgeluid geen trillingslekken ontstaan. Trillingen die ongedempt in de wanden van de kast kunnen terechtkomen kunnen daar weer aanleiding geven tot het ontstaan van luchtgeluid buiten de kast. Het is zelfs niet denkbeeldig dat de kast als een klankkast dienst doet en dus meer geluid doet ontstaan dan er oorspronkelijk aanwezig was.

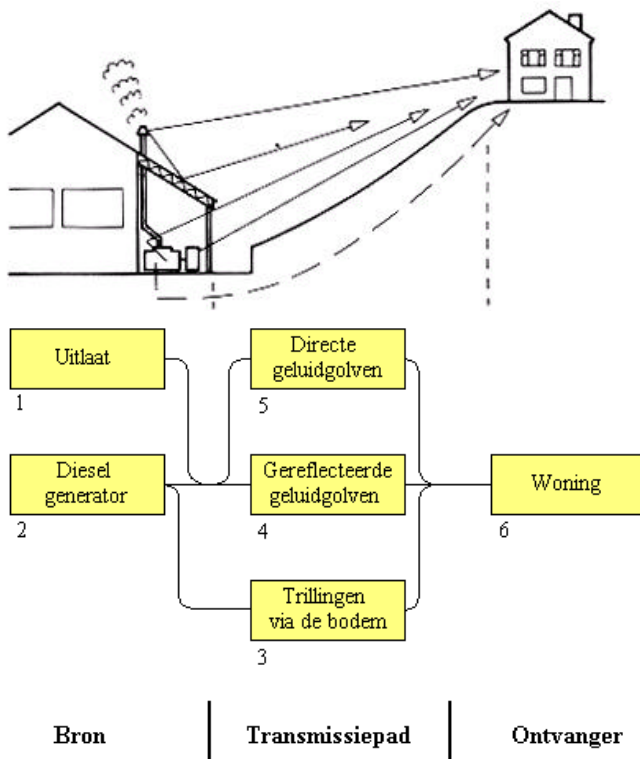


6.7 Geluidsafscherming

Geluidschermen en bermen kunnen zowel in binnensituaties als in open lucht gebruikt worden. De invloed van een scherm kan met de benaderde semi-empirische formules uit ISO9613 ingeschat worden. Naast de diffractie over de top of zijranden is het natuurlijk belangrijk dat geen geluid dwars door het scherm propageert. Daarom moet het geluidscherm geconstrueerd worden uit een materiaal met een voldoende hoge geluidverzwakkingsindex. Het is echter niet zeer nuttig de R veel groter te maken dan de maximale afscherming, die ten gevolge van diffractie bereikt kan worden. Vele geluidschermen zijn aan de bronzijde tevens voorzien van een laag absorberend materiaal. Deze heeft vooral tot doel de reflectie van geluid te reduceren. Dat is nodig om te vermijden dat het geluid na verschillende reflecties toch nog over het scherm raakt.

© INTEC, Universiteit Gent

6.8 Voorbeeld



Op de figuur hiernaast zie je een typisch voorbeeld van industrielawaai dat woningen bereikt : vaak geeft dat aanleiding tot gerechtelijke actie tegen de eigenaar van de vermoedelijke bron van dat lawaai. Een dieselmotor bevindt zich aan de achterzijde van een bedrijf, en veroorzaakt lawaai in en rond een nabijgelegen woning. Het blokdiagramma toont de opdeling in genummerde componenten van bron, transmissiepad en ontvanger.

In onderstaande tabel vind je voor elk van de genummerde componenten een aantal mogelijke maatregelen voor lawaai-beheersing.

1	2	3	4	5	6
Demper	vernieuwen	trillingsisolatie	geluidsabsorberende bekleding	omkasting	structurele geluid- en trillingsisolatie
Verplaatsen	Vervangen door geluidarme generator	Graven van gracht		scherm	vergoeden bewoner
verkleinen van buitenoppervlak	beperken werkingsduur				verplaatsen bewoner
	verplaatsen				

- Bij deze oefening van lawaai beheersing is ons doel ervoor te zorgen dat het geluidveld in de onmiddellijke omgeving van de woning voldoet aan de op die plaats geldende wettelijke normen. Hiertoe moeten we gemeten geluidparameters (b.v. het equivalent geluidsdruk niveau L_{eq}) vergelijken met vastgelegde grenswaarden, die afhangen van een aantal factoren (plaats, tijdstip ...).
- Al de maatregelen in de bovenstaande tabel kunnen bijdragen tot het verwezenlijken van een wettelijk aanvaardbaar geluidveld. Wel moeten we steeds het geheel van de maatregelen voor ogen houden. Een geluidreducerende omkasting rond de generator zelf kan, wat het lawaai probleem in en rond de woning betreft, waardeloos zijn, als de geluidsproductie van de ongedempte uitlaat hoog blijft !

© WERK, Vrije Universiteit Brussel

Inhoudstafel

1	Ervaren van geluid	1
1.1	Het gehoor	3
1.2	Frequentieafhankelijkheid van de gevoeligheid van het oor	7
1.2.1	Foon	7
1.2.2	A-weging.....	8
1.3	Maskeren.....	9
1.4	Luidheid van geluiden met algemeen spectrum	10
1.5	Verstoring van activiteiten door geluid	11
1.5.1	Verstoring van spraakcommunicatie	11
1.5.2	Effect op leerproces	13
1.5.3	Effect op werkprestatie.....	13
1.5.4	Slaapverstoring.....	14
1.6	Geluidhinder.....	16
1.7	Invloed van geluid op de gezondheid	20
1.7.1	Gehoorgeschedigings.....	20
1.7.2	Extra-auditieve effecten.....	21
2	Metten van geluid.....	22
2.1	Opbouw en gebruik van een geluidsniveaumeter	23
2.1.1	De keuze van een meetmicrofoon	23
2.1.1.1	Condensator- en elektretmicrofoons.....	23
2.1.1.2	Frequentieantwoord.....	24
2.1.1.3	Vrijeveld en random-invalmicrofoon	24
2.1.1.4	Windschermen	26
2.1.1.5	Fast-slow	27
2.1.2	Kalibratie.....	28
2.1.3	Correcte meting bij achtergrondgeluid	28
2.1.4	Verstoring van metingen door waarnemer en apparatuur.....	28
2.2	Metten van spectrale informatie	29
2.2.1	Octaafbanden.....	29
2.2.1.1	Meettechnisch.....	29
2.2.1.2	Toepassingen.....	30
2.2.2	FFT spectra.....	30
2.2.2.1	Fouriertransformatie.....	30
2.2.2.2	Fastfouriertransformatie (FFT).....	31
2.2.2.3	Vermogenspectrum.....	31
2.2.2.4	Toepassingen.....	32
2.3	Metten van geluid over langere periodes	33
2.3.1	L_{eq}	33
2.3.2	L_N	36
2.3.3	Toepassingen.....	37
2.3.3.1	Wetgeving.....	38
2.3.3.2	Analyse van geluid.....	38
2.3.3.3	Meettechnisch	40
2.4	Vectorintensiteitsmetingen.....	41
2.4.1	Vectorintensiteitsprobe.....	41
2.4.2	Toepassingen.....	42
2.5	Geluidsvermogenmetingen	44
2.5.1	Kleine geluidsbronnen.....	45
2.5.1.1	Op basis van vectorintensiteit.....	45
2.5.1.2	In vrijeveld.....	46
2.6	Grote installaties.....	50
2.6.1	Geluidskaartmethode.....	50
3	Geluidwetgeving	51
3.1	Omgevingslawaai: Vlare II.....	52
3.1.1	Milieu-effectrapportage.....	52
3.1.2	Erkenning deskundigen	54
3.1.3	Vlare II.....	55
3.2	Arbeidsveiligheid: EEG-richtlijn 86/188/EEC.....	57

4	Geluidspropagatie in open lucht	59
4.1	ISO 9613.....	60
4.1.1	Toepasbaarheid.....	60
4.1.2	Normen	61
4.1.3	Definities	62
4.1.4	Beschrijving van de bron	63
4.1.5	Basisvergelijkingen	64
4.1.5.1	Geometrische divergentie.....	65
4.1.5.2	Atmosferische absorptie.....	65
4.1.5.3	Bodemeffecten	65
4.1.5.4	Reflectie.....	66
4.1.5.5	Schermen	67
4.1.5.6	Meteorologische correctie	69
4.1.5.7	Overige types attenuatie	69
4.1.6	Figuren.....	70
4.1.7	Tabel 1.....	74
4.1.8	Tabel 2.....	75
4.1.9	Tabel 3.....	75
4.1.10	Tabel 5.....	76
4.1.11	Tabel 6.....	76
4.2	Software voor het berekenen van geluidimmissie.....	76
5	Geluid in een afgesloten ruimte.....	77
5.1	Het reverberant geluidveld of galmveld.....	78
5.2	Stralentrek	80
5.2.1	Theoretische achtergrond.....	80
5.2.2	Praktische implementatie van de theorie.....	82
5.3	Staande golven en eigenmodes.....	83
6	Bestrijden van geluidhinder.....	86
6.1	Ruimtelijke ordening	87
6.2	Bron – propagatie – waarnemer.....	87
6.2.1	Voorbeeld.....	88
6.2.2	Lawaaibeheersing.....	89
6.3	Reductie bronvermogen	90
6.3.1	Ontstaansmechanismes van geluid.....	90
6.3.2	Introductie technische mogelijkheden.....	90
6.3.2.1	Geluid veroorzaakt door machines	91
6.3.2.2	Aërodynamisch geluid.....	93
6.3.3	Specificatie bij aankoop van toestellen	94
6.4	Geluidsabsorptie.....	95
6.4.1	Definitie.....	95
6.4.2	Mechanismes	96
6.4.2.1	Poreuze absorberende materialen.....	96
6.4.2.2	Helmholtzresonatoren	98
6.4.2.3	Paneelabsorptie.....	102
6.4.3	Metten van geluidsabsorptie	103
6.4.3.1	Buismethode: loodrechte inval.....	103
6.4.3.2	Galmkamer methode: alzijdige inval.....	104
6.4.4	Toepassingen: reductie reverberant geluidveld	105
6.5	Geluiddempers op buizen.....	106
6.5.1	Dissipatief	106
6.5.2	Reactief.....	107
6.5.3	Actief	108
6.6	Geluidsisolatie.....	110
6.6.1	Luchtgeluidsisolatie.....	110
6.6.1.1	Mechanismen.....	111
6.6.1.2	Schatting van de geluidverzwakkingsindex	115
6.6.1.3	Dubbele wanden.....	116
6.6.1.4	Toepassing: omkastingen.....	118
6.7	Geluidsafscherming.....	119
6.8	Voorbeeld	119

