



Geluid in grote installaties

Teun Zijp

Geluid in grote installaties

Teun Zijp

Profielwerkstuk 4 havo

Vak: Natuurkunde

Begeleiders: Antje Zeinstra & Dick Drost

School: Alfa-college

Groningen, mei 2012

Voorwoord

Dit profielwerkstuk is geschreven in het kader van mijn HAVO opleiding. Omdat ik veel met licht en geluid bezig ben, maar van geluid nog niet zo heel erg veel afweet, ben ik mijn profielwerkstuk over geluid gaan doen. Naast dat ik net als iedereen een profielwerkstuk moet doen, hoop ik hierdoor mijn kennis op het gebied van geluid te vergroten.

Mijn vader heeft mij veel geholpen door het bedenken van theorieën, het meehelpen in experimenten, etc. Hiervoor wil ik hem graag bedanken.

Teun Zijp, Groningen, 7 mei 2012

Inhoudsopgave

Inleiding	7
1. Eigenschappen van geluid	8
1.1 Wat is geluid?	8
1.2 Hoe plant geluid zich voort?	8
1.3 Hoe wordt geluid gemeten?	8
1.4 Wat is het verschil tussen dB(A) en dB(C)?	9
2. Wat is een PA systeem?	10
2.1 Inleiding	10
2.2 Hoe werkt een luidspreker?	10
2.3 Hoe werkt een versterker?	10
2.4 Wat voor verschillende luidsprekers / versterkers zijn er?	11
3. Rendement	13
3.1 Wat is rendement?	13
3.2 Wat is het rendement van een luidspreker?	13
3.3 Wat is het rendement van een geluidsinstallatie?	14
4. Bestaat energiezuinig geluid?	17
4.1 Inleiding	17
4.2 Het geluidsniveau: “mag het wat zachter?”	17
4.3 Zijn er energiezuinige luidsprekers?	17
4.4 Zijn ze bij grote evenementen bezig met energie-besparen?	18
4.5 Wat verbruiken verschillende versterkers?	18
5. Wat is geluidsverdeling?	20
5.1 Inleiding	20
5.2 Hoe krijgen we een betere geluidsverdeling?	20
5.3 Hoe werkt geluidsverdeling in de praktijk?	22
5.4 Hoe werkt Line Array?	24
5.5 Experiment met geluidsverdeling	25
Conclusies en aanbevelingen	26
Literatuur	27
Bijlage	28

Inleiding

In discotheken wil je dat de muziek overal goed te horen is. Daarom schaffen veel discotheken een geluidsinstallatie aan. Omdat het geluid overal goed te horen moet zijn is het op sommige plaatsen zo hard dat je er doof van kunt worden. Ik vind het heel erg dat mensen doof kunnen worden in discotheken, daarom heb ik dit onderzoek uitgevoerd.

Ik vind het ook belangrijk dat we zuinig met energie omgaan. Daarom wil ik kijken of er energiezuinige manieren zijn om geluid te produceren. Dat samen brengt mij tot de volgende hoofdvraag:

Hoe kan ik zo energiezuinig mogelijk een ruimte van goed verdeeld geluid voorzien?

Hier komen de volgende deelvragen uit voort:

- Wat is geluid? Hoe wordt geluid gemeten?
- Hoe werkt een luidspreker? Wat voor soort luidsprekers zijn er?
- Hoe werkt een versterker? Wat voor verschillende versterkers zijn er?
- Wat is rendement?
- Is er verschil in rendement van verschillende soorten luidsprekers?
- Wat is het rendement van een versterker?
- Wat is het rendement van een geluidsinstallatie?
- Wat is het verband tussen Watt (W) en deciBell (dB)?

In dit verslag ga ik het eerst hebben over geluid, daarna over luidsprekers en versterkers. Vervolgens behandel ik geluidsverdeling in de ruimte.

Voor mijn onderzoek heb ik veel dingen op het internet opgezocht. Toch twijfelde ik vaak aan de betrouwbaarheid van de webpagina's, en dus heb ik zelf veel experimenten gedaan.

1. Eigenschappen van geluid

1.1 Wat is geluid?

Geluid is het trillen van de lucht. Bij geluid kijken we naar het aantal trillingen per seconde van de lucht. Dit aantal trillingen per seconde wordt uitgedrukt in de eenheid Hertz (Hz, 1 Hz = 1 trilling per seconde). Mensen kunnen geluiden van 20 Hz tot 20 kHz horen, dit zijn de gehoorgrenzen.

Daarnaast moet het geluid hard genoeg zijn, anders kun je het alsnog niet horen.

De minimale geluidsintensiteit (= geluidssterkte) die nodig is om een geluid te horen is de gehoordrempel. De gehoordrempel verschilt per toonhoogte, en is ook per mens verschillend.

Ook de gehoorgrenzen zijn niet voor alle mensen gelijk. De bovenste gehoorgrens (20 kHz) hangt vooral af van je leeftijd. Bijvoorbeeld: een beeldbuis-TV, waarvan het geluid uit staat, piept nog met een pieptoon van ~15 kHz, jonge mensen kunnen deze toon horen. Mensen van 30 jaar kunnen deze toon meestal niet meer horen. De meeste bejaarden horen zelfs geen tonen boven de 6 kHz ⁽¹⁾.

1.2 Hoe plant geluid zich voort?

Luidsprekers zenden geluid uit. Geluid is een vorm van energie, dus luidsprekers zenden vermogen uit. De oppervlakte, die dit vermogen bereikt, is vooral afhankelijk van de afstand. In een open veld neemt de oppervlakte die dit vermogen bereikt kwadratisch toe met de afstand. Hierdoor neemt de geluidsintensiteit kwadratisch af. Geluidsintensiteit wordt uitgedrukt in W/m².

1.3 Hoe wordt geluid gemeten?

Geluid wordt gemeten in W/m², maar weergegeven in deciBell (dB). Dit heeft een simpele rede. We komen in het dagelijks leven harde en zachte geluiden tegen. Zou je dat in W/m² weergeven, dan krijgen we intensiteiten van 0,000000001 – 1 W/m². Zoveel nullen is niet handig.

Daar heeft de heer Bell iets op bedacht: de deciBell (dB). Hij heeft een simpele formule bedacht waarmee we W/m² kunnen omzetten in iets wat we makkelijk kunnen opschrijven.

De formule is:

$$dB = 10 * \text{LOG} (W/m^2) + 120$$

Tabel 1: Verschillende geluiden in W/m² en dB.

Soort geluid	W/m ²	dB
Bibliotheek	0,000000001	30
Stille woonstraat	0,000000010	40
Rustig gesprek	0,000000100	50
Geanimeerd gesprek	0,000001000	60
Luide muziek van radio of TV	0,000010000	70
Drukke verkeersweg	0,000100000	80
Personenauto	0,001000000	90
Helikopter op 30 m hoogte	0,010000000	100
Popgroep, cirkelzaag	0,100000000	110
Autoclaxon vlakbij	1,000000000	120

1.4 Wat is het verschil tussen dB(A) en dB(C)?

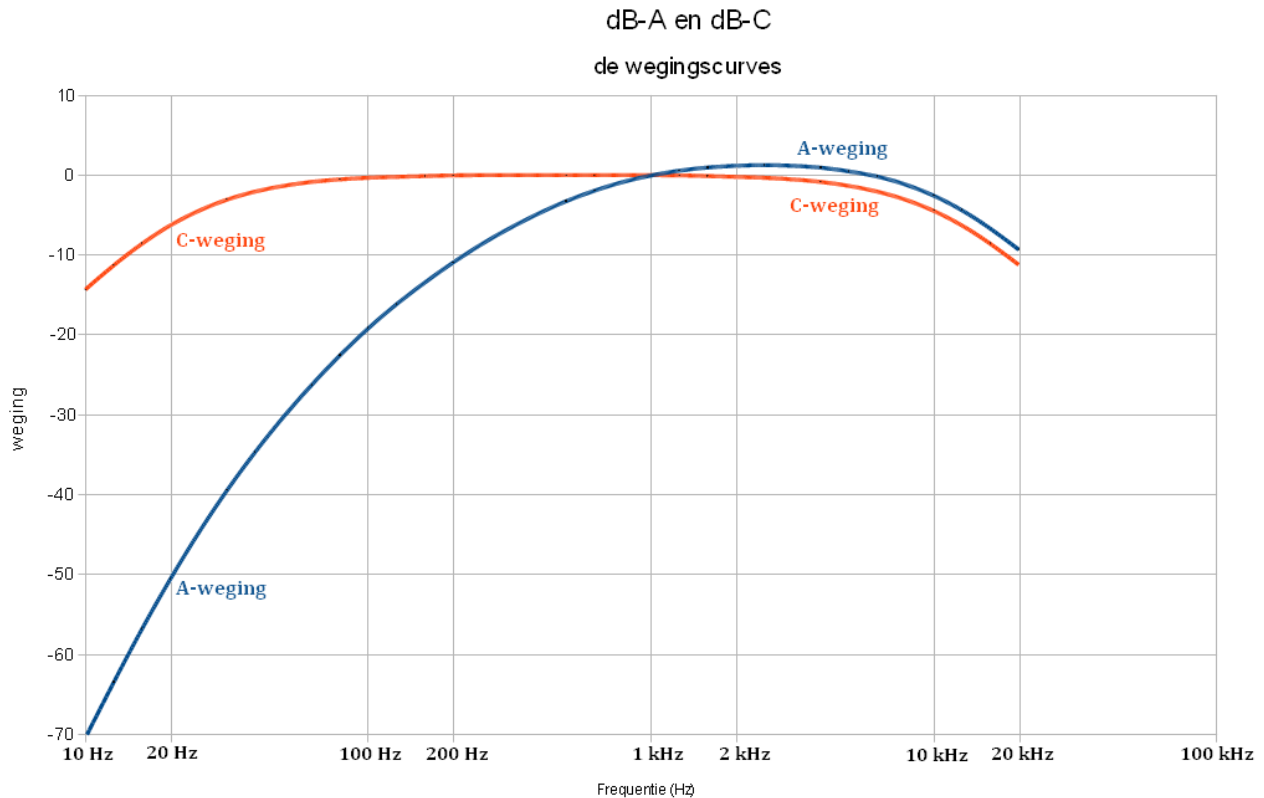
Geluid wordt gemeten in dB(A) en dB(C). Het verschil tussen dB(A) en dB(C) is waarvoor hij gebruikt wordt. In het menselijk oor komen niet alle tonen even hard binnen, zo horen we lage tonen minder hard, middentonen horen we iets beter, en hoge tonen horen we weer zachter. Hier moet je rekening mee houden als je gaat onderzoeken of je van een bepaald geluid doof wordt. Hiervoor hebben ze iets bedacht: 'wegingscurves'.

Als je kijkt of je ergens doof van wordt, gebruik je dB(A).

Voor een luidspreker maakt het niet uit: als hij lucht in beweging zet, kost dit hem energie.

Als je bezig bent met het rendement van een luidspreker is, gebruik je dB(C).

De wegingscurves zijn afgebeeld in afbeelding 1.



Afbeelding 1: Wegingscurves dB(A) en dB(C) die worden gebruikt voor het meten van geluid⁽²⁾.

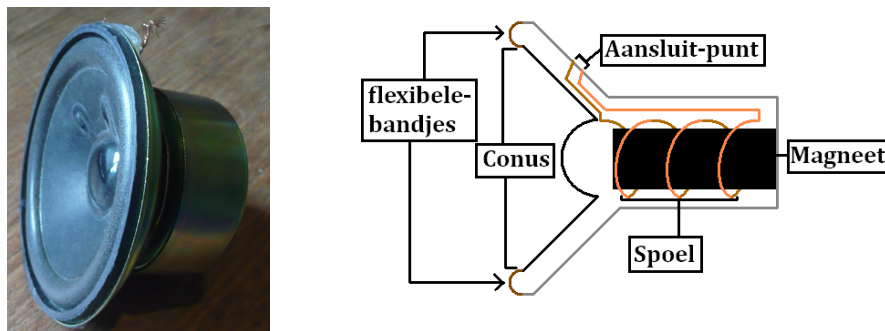
2. Wat is een PA systeem?

2.1 Inleiding

In de huiskamer zet je wel eens een muziekje op, dat hoeft niet zo hard, want je zit één meter verderop te luisteren. Als je aan een groot publiek een muziekje wilt laten horen lukt dat niet met een huiskamer geluidssysteem. Je publiek zit iets verder weg, dus moet het geluidssysteem iets harder kunnen. Een PA systeem is een geluidssysteem voor “Public-Address”, een groot publiek. Je hoeft niet alleen aan concerten te denken, ook op vliegvelden worden passagiers omgeroepen via een PA systeem. Ik ga het hebben over de PA-systemen voor muziek. Deze ga ik vergelijken met huiskamer geluidssystemen.

2.2 Hoe werkt een luidspreker?

Geluid is het trillen van de lucht. Er zijn een boel instrumenten uitgevonden die geluid maken, zoals de piano, de gitaar, de blokfluit, etc. Ieder instrument heeft zijn eigen geluid, een blokfluit klinkt anders dan een piano. Luidsprekers kunnen ook geluid maken, maar zij hebben geen eigen geluid. Goede luidsprekers kunnen de geluiden van alle instrumenten namaken.



Afbeelding 2: Een luidspreker en een schematische doorsnede van een luidspreker.

Voor het maken van geluid heb je energie nodig. Bij instrumenten wordt deze energie er handmatig ingestopt (bijvoorbeeld door een snaar aan te slaan). Bij luidsprekers (afbeelding 2) stop je er elektrische energie in. Deze elektrische energie gaat op een spoel, hierdoor wordt de spoel een magneet, hij duwt zich weg van de magneet. De spoel duwt tegen de conus aan, en de conus duwt de lucht weg. Even later wisselt de stroom om, hij gaat “achteruit” door de spoel. Hierdoor wordt de spoel een magneet die zich naar de magneet toe trekt. De spoel trekt de conus mee, en de conus zuigt de lucht naar zich toe. De stroom wisselt best snel van richting, hij “trilt”. In dezelfde frequentie wordt de lucht in trilling gezet.

2.3 Hoe werkt een versterker?

Een versterker versterkt een signaal. Als je thuis naar een CD luistert, dan stuurt de CD-speler een signaal naar de versterker. Het signaal wat de versterker in gaat heeft een spanning van ongeveer 1,8 V en een stroom van ongeveer 0,09 mA (20 k Ω). Dat signaal wordt versterkt naar bijvoorbeeld 1 V en 0,125 A, een bruikbaar signaal voor een luidspreker met 8 Ω impedantie. De interne werking van een versterker is zeer ingewikkeld, en niet relevant voor dit verslag. Daarom ga ik dat niet uitleggen.

2.4 Wat voor verschillende luidsprekers / versterkers zijn er?

Verschillende versterkers en verschillende luidsprekers worden voor verschillende doeleinden gebruikt. Sommige PC's hebben geen eigen luidsprekers, hiervoor zijn PC-luidsprekers op de markt gekomen (afbeelding 3). Ze hebben een belabberde kwaliteit, maar alles is beter dan geen geluid. Ze hebben wel het voordeel dat ze een ingebouwde versterker hebben.



Afbeelding 3: Verschillende versterkers: PC-luidsprekers met ingebouwde versterker, CD-speler, huiskamer versterker, discoversterker.

Onder de PC luidsprekers (afbeelding 3) zie je een CD-speler. Hierin zit ook een versterker: “voorversterkers”. Zij versterken het signaal van de CD, naar een signaal wat de “eindversterker” kan gebruiken. Ook in eindversterkers zijn er verschillen, in bijvoorbeeld kwaliteit, en hoe hard ze kunnen. De huiskamerversterker doet het meestal redelijk, tenzij je hem hard zet. Dan gaat hij ruisen of hij laat het signaal “clippen” (afbeelding 4). Er zijn ook professionele versterkers die niet ruisen als ze hard staan. Verder kunnen zij iets harder voordat ze gaan “clippen”.



Afbeelding 4: Geclipt signaal (links) en signaal zoals dat had moeten zijn (rechts, in rood).

Voor luidsprekers zijn er ook een boel varianten. Om te beginnen zijn er verschillen om andere toonhoogten te kunnen laten horen. Zo zijn er de tweeter, squarker, woofer (afbeelding 5a).

De tweeter kan alleen hoge tonen maken.

De squarker kan alleen midentonen maken, zoals spraak.

De woofer kan alleen lage tonen maken.



Afbeelding 5: Verschillen in luidsprekers. Voor hoge of lage tonen (a), voor hard of zacht geluid (b), actief of passief (c)

Daarnaast verschillen luidsprekers in hoe hard ze kunnen. In afbeelding 5b zie je disco luidsprekers, die kunnen met gemak 110 dB produceren. De huiskamer luidsprekers, die erop staan, kunnen niet zo hard. Het hout van deze luidspreker gaat op 95 dB al zo hard meetrillen, dat het stof wordt. Het laatste verschil is dat sommige luidsprekers een ingebouwde versterker hebben (afbeelding 5c). Deze sluit je aan op het stopcontact, en op de CD speler. Een luidspreker met ingebouwde versterker heet een actieve luidspreker. De meeste luidsprekers zijn passief, en moeten worden aangesloten op een versterker. Boven in afbeelding 5c zie je de meest gebruikte aansluitingen voor deze passieve luidsprekers.

3. Rendement

3.1 Wat is rendement?

In alle apparaten moet je energie stoppen, voordat je er energie uit kan halen. Het rendement van een apparaat is het deel nuttige vermogen dat je eruit haalt, gedeeld door het deel vermogen dat je erin hebt gestopt.

$$\text{Rendement} = \frac{P_{\text{nuttig}}}{P_{\text{in}}}$$

Bijvoorbeeld: Bij gloeilampen stop je elektrische energie in de lamp, waardoor de gloeidraad heet wordt en gaat gloeien. Je zet de lamp niet aan omdat je het koud hebt, maar omdat je het te donker vindt. Alleen het deel licht is voor jou dus nuttige energie. De gloeilamp maakt 5% licht, en 95% warmte. Het rendement van een gloeilamp is dus 5%.

3.2 Wat is het rendement van een luidspreker?

Ik heb verschillende luidsprekers onderzocht. Een losse luidspreker, een luidspreker in een box, een huiskamer luidspreker, een luidspreker met een hogere impedantie, en professionele luidsprekers. De proefopstelling staat in afbeelding 6. Tijdens de proef heb ik sinusvormige signalen gebruikt. Dit doe ik omdat het makkelijk is om van een sinusvormig signaal (afbeelding 10) de gemiddelde spanning uit te rekenen. De spanning heb ik nodig om het gemiddeld ingangsvermogen te berekenen. De spanning heb ik afgelezen op foto's van een oscilloscoop.

Vervolgens moet ik met de spanning (U) het vermogen (P) berekenen.

Ik weet de impedantie van de luidspreker is Z. Die is 4 Ω, 6 Ω of 8 Ω. Verder heb ik twee formules:

Formule 1: $Z = U / I \rightarrow \Omega = \text{Volt} / \text{Ampère} \rightarrow \text{Ampère} = \text{Volt} / \Omega$

Formule 2: $P = U * I \rightarrow \text{Watt} = \text{Volt} * \text{Ampère} \rightarrow \text{Watt} = \text{Volt} * (\text{Volt} / \Omega)$

De formule waarmee ik ga werken: $P_{\text{in}} = U^2 / Z \rightarrow \text{Watt} = \text{Volt}^2 / \Omega$

Nu moet ik het uitgangsvermogen berekenen (P_{nuttig}). Met de dB meter heb ik het aantal dB wat de luidspreker produceert gemeten. De waarden in dB zet ik om in W/m², met de formule:

$$W/m^2 = 10^{((dB-120)/10)}$$

de geluidsintensiteit in W/m² doen we keer de lucht-oppervlakte:

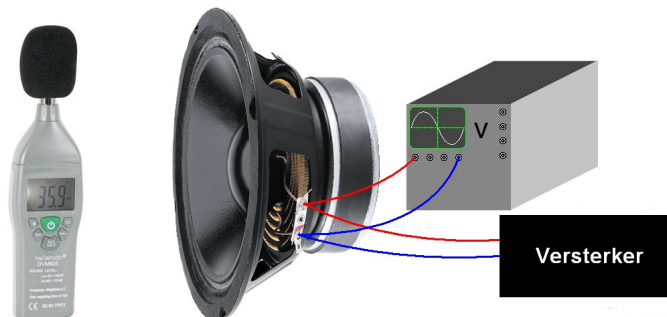
$$(m^2) = 4 \pi * (m)^2 * 50\%$$

$$W/m^2 * m^2 = W = P_{\text{nuttig}}$$

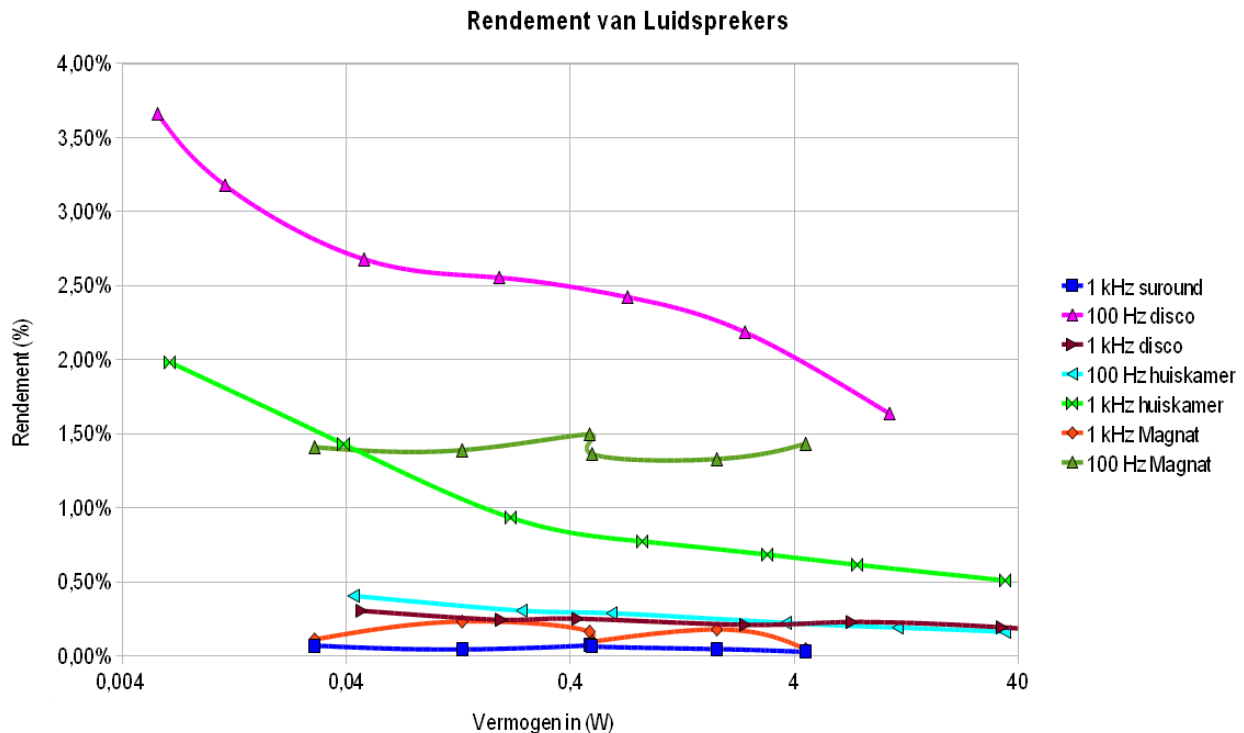
(← ik maak altijd een schatting hoe groot het gedeelte van de bol is, waar de luidspreker geluid in uitzendt.)

Nu we P_{in} en P_{nuttig} hebben, kunnen we het rendement van luidsprekers uitrekenen!

De berekende waarden staan in afbeelding 7.



Afbeelding 6: Schematische proefopstelling van het experiment rendement van luidsprekers.



Afbeelding 7: Grafiek van het gemeten rendement van verschillende luidsprekers bij 100 Hz en 1 kHz

Wat als eerste opvalt, is dat het rendement ontzettend laag is. Het is namelijk allemaal lager dan 5%, dus nog slechter dan een gloeilamp. Wat me opvalt aan de grafiek is dat de grotere luidsprekers een hoger rendement hebben bij lagere tonen. Huiskamer luidsprekers hebben een hoger rendement bij hoge tonen. Hoe groter het vermogen, hoe lager het rendement.

3.3 Wat is het rendement van een geluidsinstallatie?

Het rendement van een luidspreker zegt niet alles, want is ook afhankelijk van het rendement van een versterker. En wat gebeurt er met het totale rendement als het geluid harder wordt gezet?

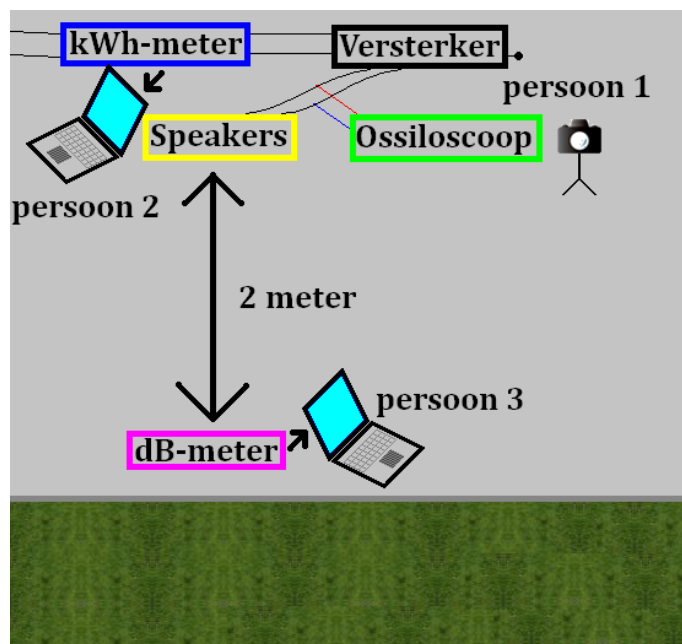
Om dat te bepalen moeten we ook weten hoeveel vermogen de versterker verbruikt. Dit bepalen we met een Watt-meter (afbeelding 8).



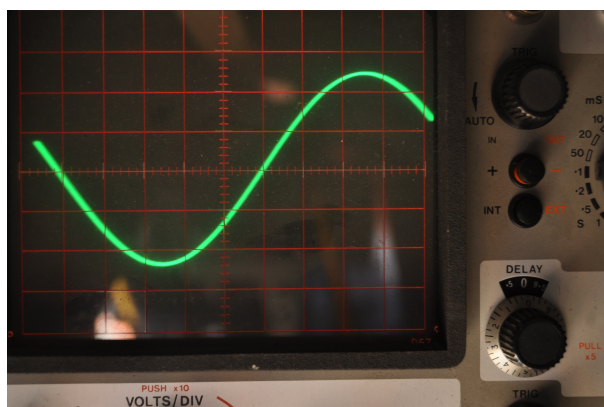
Afbeelding 8: Een Watt-meter

Ik kan het vermogen wat de versterker in gaat dus aflezen op het display van de Watt-meter. Het vermogen wat de versterker uit komt, bepaal ik met de oscilloscoop. Dat is ook het vermogen wat de luidspreker in gaat. Het vermogen wat de luidspreker uit komt, meet ik met behulp van een dB meter. Om zeker te weten dat ik de juiste waarden krijg op de dB meter, doe ik deze proef buiten. De geluidsdruk van de luidspreker gaat weg, een grasveld in. Het is niet zo dat het geluid reflecteert tegen een muur, want dan zou ik een hogere waarde krijgen op de dB meter dan waar ik naar op zoek ben.

De proefopstelling staat in afbeelding 9.

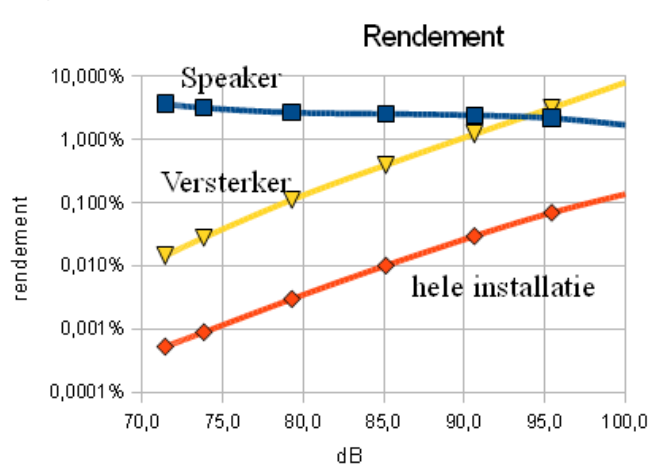
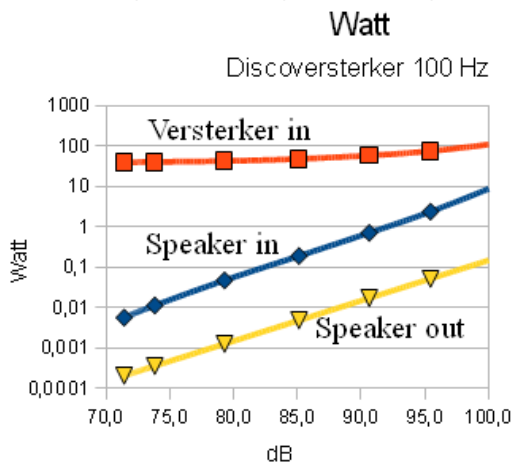
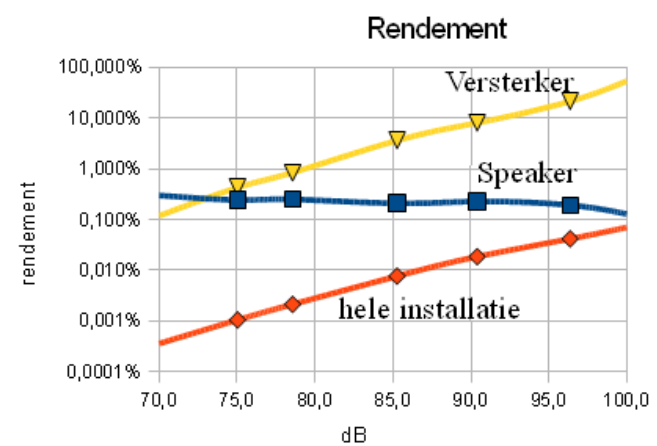
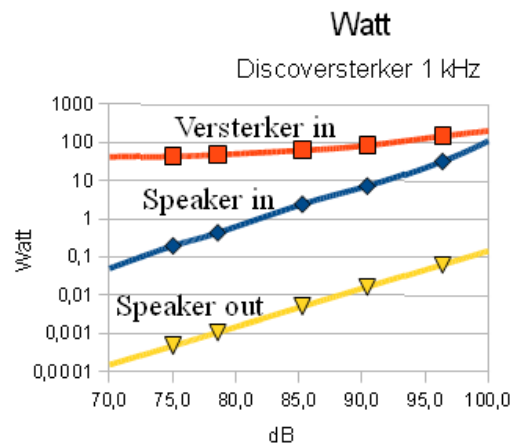
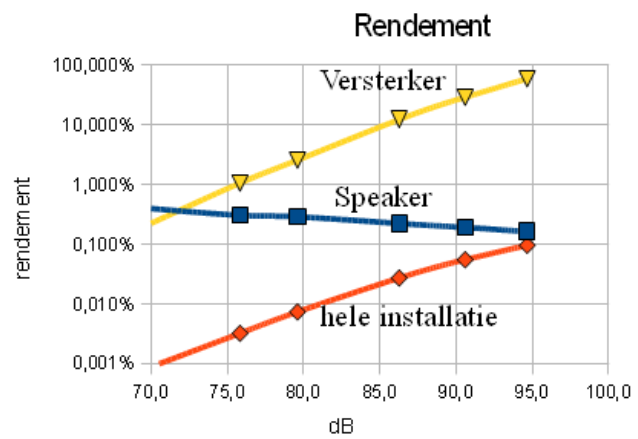
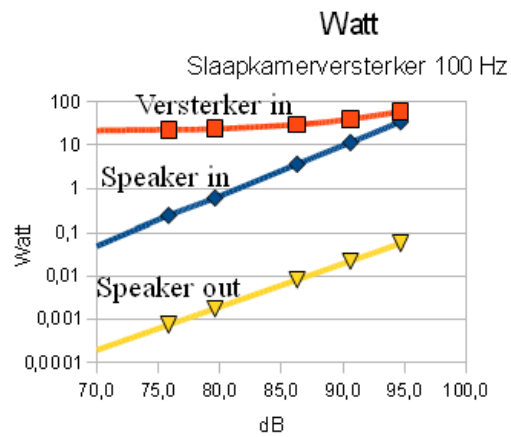
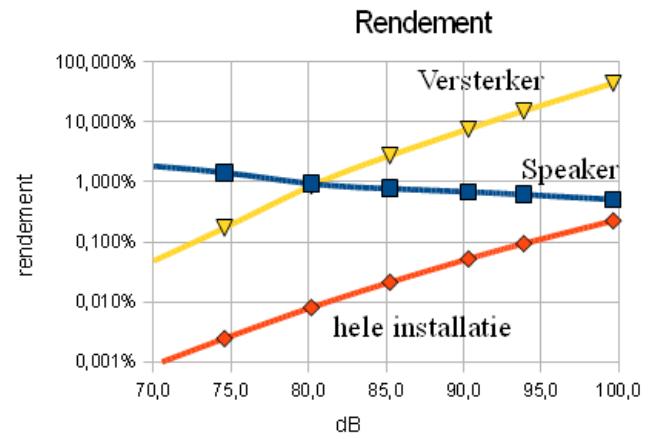
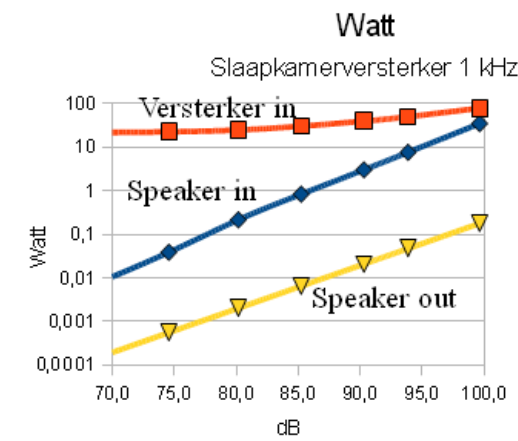


Afbeelding 9: De proefopstelling om het rendement van een geluidsinstallatie te bepalen, schematisch.



Afbeelding 10: Een sinusvormige uitslag op de scoop

Wat me opvalt aan de grafieken in afbeelding 11, is dat het rendement weer heel laag is. Als het geluid harder wordt gezet, wordt het rendement van de versterkers beter. Het rendement van de luidsprekers wordt dan juist minder. Het rendement van de versterkers verbetert zo veel, dat het rendement van de hele installatie ook hoger wordt als het geluid harder gezet wordt.



Afbeelding 11: De resultaten.

4. Bestaat energiezuinig geluid?

4.1 Inleiding

energiezuinig geluid bestaat niet, net als energiezuinig licht. Het produceren van geluid kost energie. We kunnen wel kijken of we het geluid op een energiezuinige manier kunnen produceren. Lang werd gedacht dat lampen niet energiezuiniger kunnen. Dit blijkt nu wel zuiniger te kunnen, met spaarlampen en led-lampen, die een hoger rendement hebben. Hoe zit dat bij geluidsinstallaties? Hoe komt het dat in sommige discotheken de geluidsinstallatie meer dan 5 kW gebruikt? Welke dingen kunnen we beïnvloeden?

4.2 Het geluidsniveau: “mag het wat zachter?”

Het schijnt dat er veel evenementen zijn waarbij het geluid boven de 120 dB komt, dat is meer dan 1 W/m². Als ze op 100 dB gaan draaien, kunnen ze flink energie besparen. Misschien is dat ook fijner voor het gehoor. In Tabel 2 staat voor verschillende geluidsniveau's de maximale blootstellingstijd per dag waarbij nog geen gehoorbeschadiging optreedt⁽³⁾.

Waarom wordt er nu nog niet gedraaid op een lager geluidsniveau, bijvoorbeeld 100 dB? Daar is onderzoek naar gedaan in Frankrijk⁽⁴⁾. Ze zijn tot de conclusie gekomen dat harde muziek leidt tot meer alcohol-consumptie. Waarschijnlijk is dit omdat je minder kletst, en meer danst & drinkt. Dit vindt de discotheek wel “*goed voor de economie...*”

Tabel 2: Maximale dagelijkse blootstellingstijd vóórdát gehoorbeschadiging optreedt.

Geluidsniveau dB(A)	Maximale dagelijkse tijd
80	8 uren
83	4 uren
90	48 minuten
100	5 minuten
110	30 seconden
120	3 seconden

4.3 Zijn er energiezuinige luidsprekers?

Ik dacht eerst dat het rendement van luidsprekers hetzelfde is als iets vergelijkbaars. Een magneet met een spoel, dat zijn ook twee onderdelen van een elektromotor. Het rendement van een elektromotor is 95%⁽⁵⁾, maar uit mijn experimenten uit hoofdstuk 3 is gebleken dat dit niet zo is. Ik heb op internet gezocht, en heb gevonden: een luidspreker met een rendement van 15% – 20%⁽⁶⁾. Deze luidsprekers worden gebruikt bij rock-concerten. Hoog, maar nog lang niet zo hoog als ik verwacht had.

Uit mijn experiment in hoofdstuk 3 kreeg ik ineens ideeën: zou het rendement afhankelijk zijn van de impedantie? Dit dacht ik vooral omdat de disco luidsprekers van 8 Ω, gemiddeld een hoger rendement hadden dan de huiskamer luidsprekers van 4 Ω. Ik deed een kort experiment in de huiskamer, met een toon van 1 kHz. Ik ging de huiskamer luidspreker van 4 Ω vergelijken met de huiskamer luidspreker van 6 Ω. Ik heb een resultaat: het rendement van de luidspreker van 4 Ω is ongeveer 0,95%, het rendement van de luidspreker van 6 Ω is ongeveer 0,44%.

Later bedacht ik dat dit experiment niet genoeg was, want ik had alleen 1 kHz geprobeerd, misschien is het bij 100 Hz wel heel anders. Ik deed het experiment nog een keer, maar deze keer met beide tonen. De gevonden waarden staan in tabel 3.

Tabel 3: Het rendement van 2 verschillende luidsprekers bij verschillende tonen

Luidspreker:	Toon:	Rendement:
6 Ω (Sony)	100 Hz	0,12%
6 Ω (Sony)	1 kHz	0,21%
4 Ω (Philips)	100 Hz	0,39%
4 Ω (Philips)	1 kHz	0,82%

Conclusie: het rendement is niet direct te koppelen aan de impedantie.



vooraanzicht



achteraanzicht

Afbeelding 12: Line-array luidsprekersysteem.

Links: acht line-array luidsprekers, ieder gericht op een apart deel van de zaal. Rechts: aan de achterkant worden signaal en elektriciteit door gelinkt⁽⁹⁾

4.4 Zijn ze bij grote evenementen bezig met energie-besparen?

NEE! Een concert is een hel voor de energie-hippie. Want hoe goed de LED-lampen ook zijn, bij grote evenementen zie je dat ze nog steeds gloeilampen gebruiken. En hoe goed zonne-energie ook is, je ziet nog steeds dat er diesel-generatoren gebruikt worden. Toch doen ze het op het gebied van geluid vrij energiezuinig. Ze zetten alles iets te hard, dat klopt, maar ze hebben speciale luidsprekers, die de “output richt op het publiek”. Andere luidsprekers zijn ongericht, en sturen dus ook veel geluid naar de lucht boven het publiek. Daar hangt niemand. Gerichte luidsprekers zijn veel duurder dan andere PA luidsprekers. Een gerichte luidspreker-box kost ongeveer € 2000 per stuk en je hebt er meerdere nodig. Deze open-lucht-podium-luidsprekers heten line-array (afbeelding 12). Misschien herken je ze, deze speakers zijn aan elkaar gelinkt.



Afbeelding 13: PC-luidsprekers naast het beeldscherm.

4.5 Wat verbruiken verschillende versterkers?

Dit heb ik onderzocht, met 3 soorten versterkers, de eerste is mijn slaapkamerversterker, de tweede is onze professionele woonkamer versterker, de derde is de discoversterker van een vriend van mij. Ik heb gekeken naar het rustvermogen, dat is de energie die de versterker opneemt, als er geen geluid uit de luidsprekers komt. De waarden staan in tabel 4.

Tabel 4: Rustvermogen van verschillende versterkers.

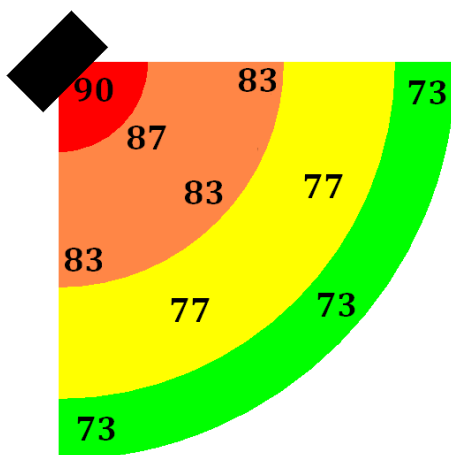
Soort versterker	Rustvermogen (W)
PC-luidspreker	5,4
Kamerversterker	21
Discoversterker	39,5
Pioneer versterker	110

Je ziet dat een duurder versterker een groter rustvermogen heeft. Dit verbaast mij, want duurder is beter, en beter is toch zuiniger? Dat blijkt niet zo te zijn. Hele goedkope versterkers, zoals die in de luidsprekers van je computer zitten (zie afbeelding 13), verbruiken weinig energie. Het versterkertje heeft een heel laag rustvermogen, maar hij broemt, en dat kun je horen. Dit brommen heet vervorming, omdat hij deze bromtonen niet in zijn signaal binnen krijgt. Bij duurder versterkers hoor je geen bromtoon. De vervorming wordt onderdrukt. En bij hele dure versterkers hoor je zelfs geen ruis als het geluid heel hard staat. Bij wijze van spreken kost vervorming onderdrukken energie. Formeel gezien wordt bij het voorkomen van vervorming gebruik gemaakt van een techniek die een hoog rustvermogen vereist.

5. Wat is geluidsverdeling?

5.1 Inleiding

In een zaal met een slechte geluidsverdeling merk je dat het geluid op de ene plek veel harder is dan op de andere plek. Dit komt doordat er dan te weinig luidsprekers zijn, of doordat ze op verkeerde plekken geplaatst zijn. Want luidsprekers geven een bepaald vermogen aan de lucht. Verder van de luidspreker wordt dit vermogen verdeeld over een groter oppervlakte, en wordt daarmee de geluidsintensiteit lager. Als je weet hoeveel vermogen er uit de luidspreker komt, en je weet de afstand tot de luidspreker, kun je de geluidsintensiteit uitrekenen, in W/m^2 . Als je meerdere luidsprekers gebruikt, kun je in ieder punt van de zaal, de geluidsintensiteit van iedere luidspreker uitrekenen, en ze bij elkaar optellen. Bij een ideale geluidsverdeling is het geluid overal in de zaal even hard. In de volgende afbeeldingen heb ik iedere geluidsintensiteit een kleur gegeven (afbeelding 14), hierdoor kun je de geluidsverdeling in één oogopslag zien. Het zwarte blokje stelt de luidspreker voor.



Afbeelding 14: Geluidsverdeling bij één luidspreker, de getallen zijn in dB.

Om verschillende technieken voor geluidsverdeling met elkaar te kunnen vergelijken maak ik tabellen. Deze tabellen stellen een gymzaal voor, van 21 bij 12 meter. De kleuren geven aan hoe “gevaarlijk” het geluid is. Vanaf 80 dB(A) kun je doof worden. Nou valt dat bij 80 dB nog wel mee, je kunt dit dagelijks 8 uur lang luisteren. Maar als het geluid harder wordt, wordt die maximale dagelijkse tijd ook steeds korter (afbeelding 15).

5.2 Hoe krijgen we een betere geluidsverdeling?

Er zijn een aantal mogelijkheden om een betere geluidsverdeling te krijgen.

Mogelijkheid 1: Het gebruiken van meerdere luidsprekers. Bijvoorbeeld in iedere hoek van de zaal één.

Mogelijkheid 2: Het gebruiken van één luidspreker, in het midden van de zaal, opgehangen op de hoogst mogelijke hoogte. Hierdoor is de afstand tot deze luidspreker op alle punten in de zaal ongeveer gelijk.

Mogelijkheid 3: Plafond en vloer van tegels, beton, en ander niet dempend materiaal. Hierdoor gaat het geluid weerkaatsen, en daardoor neemt de oppervlakte waar “energie in gaat zitten”, in de vorm van geluid, niet meer kwadratisch toe. Als je dit goed doet zal de oppervlakte zelfs lineair toenemen. Hieronder geef ik een voorbeeld hoe de geluidsverdeling beïnvloed wordt door deze factor.

Mogelijkheid 4: Het gebruiken van line-array luidsprekers. Deze luidsprekers zijn gericht. Hierdoor neemt oppervlakte, wat in trilling wordt gezet, niet veel toe. Daardoor is de geluidsdruk minder afhankelijk van de afstand. Je hoort het geluid niet steeds harder worden als je naar deze luidspreker toe loopt. In hoofdstuk 5.4 leg ik hier meer over uit.

Bij mogelijkheid 3 maak ik een uitwerking:

Ruimte 1 is een ruimte met veel dempend materiaal, zoals met gordijnen, tapijt, en dempend plafond. Het geluid gedraagt zich zoals in het open veld. Hier verdeelt het geluid zich als over een boloppervlak.

De formule van het oppervlak: $A = 4\pi r^2$

Ruimte 2 is een ruimte waarin geluid weerkaatst tegen het plafond en de vloer. Die zijn van bijv. beton en tegels. Door de weerkaatsing verdeelt het geluid zich als over een cilinder. Hierin neemt het lucht-oppervlak lineair toe, zoals de omtrek van een cirkel.

De formule van het oppervlak: $A = 2\pi rh$

Tabel 5: Vergelijking tussen geluidsverdeling in open veld en ruimte met weerkaatsend plafond en vloer.

Afstand tot de luidspreker (m)	Berekend in ruimte 1 (dB)	Berekend in ruimte 2 (dB)
1	90	90
10	70	80
100	50	70

Conclusie: bij mogelijkheid 3 neemt de geluidsintensiteit langzamer af door de weerkaatsing.

Afbeelding 15: Tabel met dB en de maximale tijd waaraan je dagelijks blootgesteld kan worden, zonder dat er gehoorbeschadiging optreedt. Kleurenlegenda bij volgende figuren

dB (A)	maximale tijd: minuten
95	15
94	19
93	24
92	30
91	38
90	48
89	60
88	76
87	96
86	121
85	152
84	191
83	241
82	303
81	381
80	480
79	∞
78	∞
77	∞
76	∞
75	∞
74	∞
73	∞
72	∞
71	∞

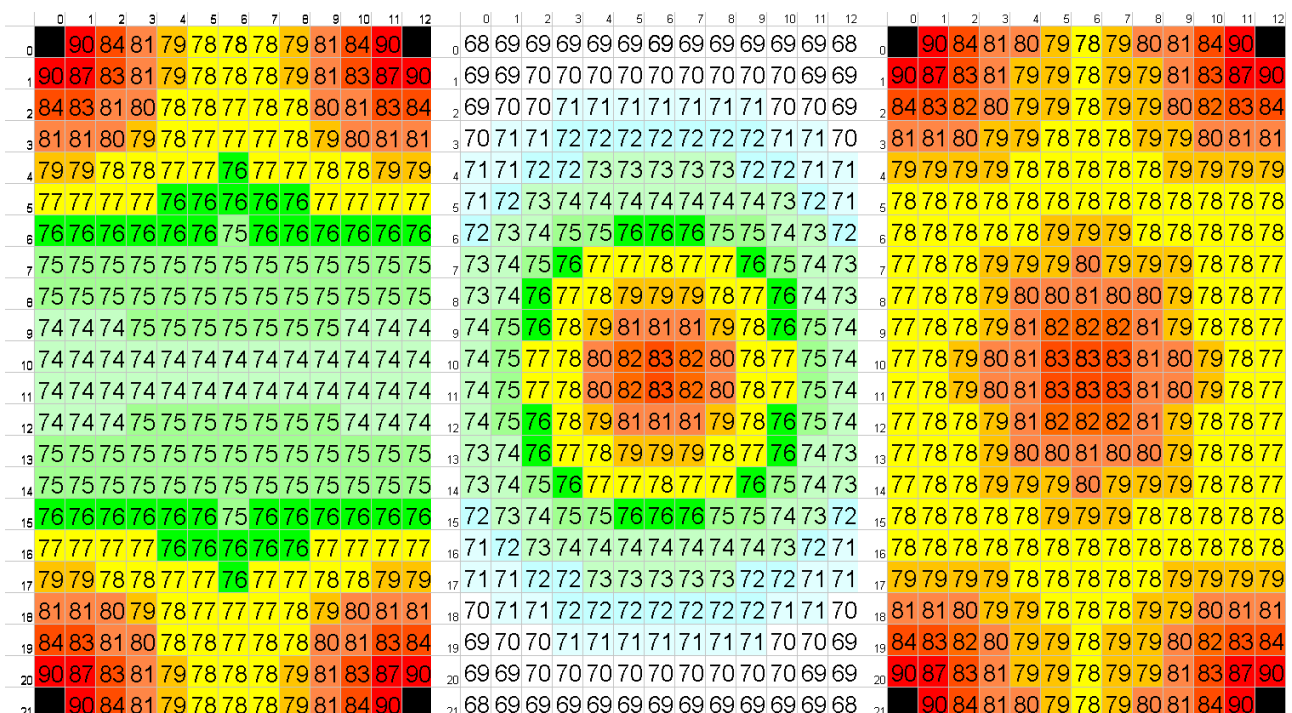
5.3 Hoe werkt geluidsverdeling in de praktijk?

Een boel manieren om een betere geluidsverdeling te krijgen, maar hoe werken ze in de praktijk?

Mogelijkheid 1a: Het gebruik van meer luidsprekers, hier in iedere hoek één. Bij het gebruik van vier luidsprekers in iedere hoek, is in het midden van de zaal het geluid het aller zachtst. Als je er vanuit gaat dat er vooral in het midden van de zaal gedanst wordt, is dit dus niet een handige geluidsverdeling. Zie afbeelding 16a.

Mogelijkheid 2: Bij het gebruiken van één luidspreker, hoog, in het midden van de zaal, zitten we met het probleem dat de meeste zalen niet heel hoog zijn. Waarschijnlijk lukt het wel om de luidspreker op 4 meter hoog op te hangen. Dit is 2,3 meter boven de gemiddelde oorhoogte. Doordat de luidspreker niet hoog genoeg hangt, is de afstand tot de luidspreker nog steeds sterk variërend, en zo wordt de geluidsintensiteit niet overal even hard. Zie afbeelding 16b.

Mogelijkheid 1b: Een combinatie van mogelijkheid 1a en mogelijkheid 2. Dit is het principe van meerdere luidsprekers gebruiken. Deze methode geeft een mooie geluidsverdeling, zie afbeelding 16c. Eigenlijk heeft het idee van de vier luidsprekers een gat in het midden. Dat gat wordt nu op gevuld door de luidspreker die in het midden van de zaal hangt.



16a
in ieder hoek één

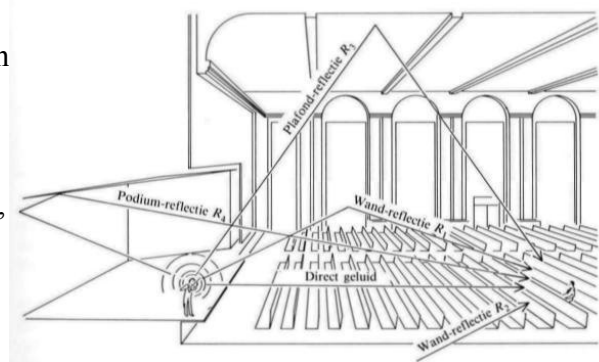
16b
één aan het plafond

16c
de combinatie

Afbeelding 16: Geluidsverdeling bij vier luidsprekers in de hoek (a), één luidspreker aan het plafond (b) en de combinatie van a en b (c).

Ik ga nu mogelijkheid 3 en mogelijkheid 4 vergelijken met “gewone omgeving met gewone luidsprekers”.

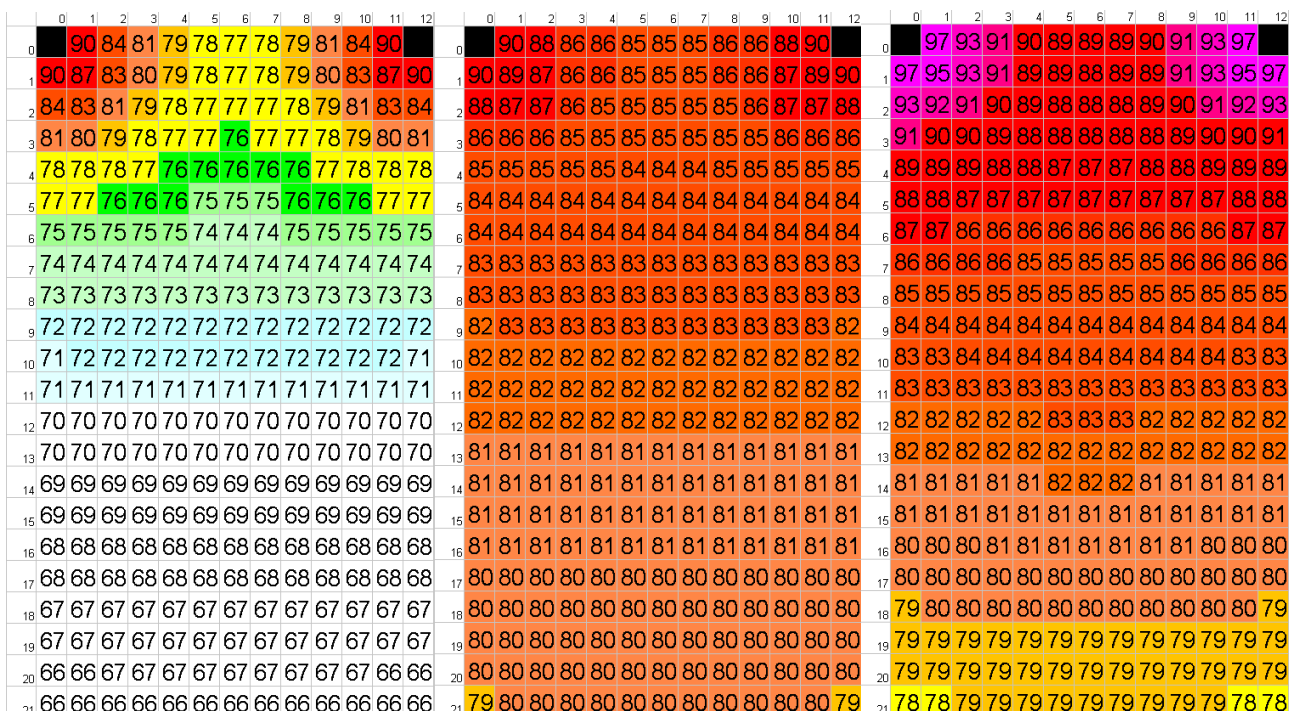
Mogelijkheid 3: Plafond en vloer van tegels en beton maken, zodat het geluid gereflecteerd wordt, en niet geabsorbeerd. Het nadeel hiervan is dat je galm krijgt. Soms is galm mooi, vooral bij klassieke muziek. Bij andere muziek genres is galm niet mooi, en is deze techniek niet aan te raden.



Mogelijkheid 4: Het gebruiken van Line-Array luidsprekers. Deze techniek wordt in de praktijk het meest gebruikt. Dit komt omdat het een goede geluidsverdeling geeft, ongeveer net zoals bij de “galm-techniek”, maar Line-Array galmt niet, en is makkelijker te verplaatsen dan een betonnen plafond. In het volgende hoofdstuk ga ik iets meer over Line Array uitleggen.



Voor de berekeningen is de output van iedere luidspreker altijd hetzelfde: 0,012566 watt (dit komt overeen met 90 dB @ 1 m, gewone luidspreker). De oppervlakte waarover dit vermogen verdeeld wordt is afhankelijk van de afstand tot de luidspreker. De manier waarop deze oppervlakte toeneemt na mate de afstand toeneemt verschilt per techniek.

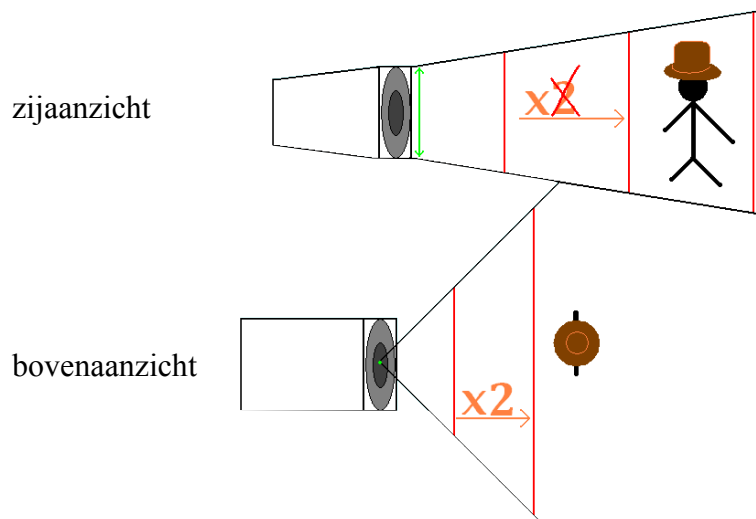


17a gewone luidspreker gewone ruimte 17b “Galm techniek” 17c Line-array-techniek

Afbeelding 17: Geluidsverdeling bij verschillende mogelijkheden.

5.4 Hoe werkt Line Array?

Line Array luidsprekers zijn bijzonder, omdat ze gericht zijn⁽⁷⁾. Dit heeft twee voordelen: het geluid wordt gebundeld op het publiek. Verder neemt de luchtoppervlakte minder snel toe, als de afstand tot de luidspreker groter wordt. Gewone luidsprekers zenden het geluid in alle richtingen uit. De line-array luidspreker zendt het geluid uit zoals je in afbeelding 18 ziet. Ik heb gekozen voor een line-array die het geluid horizontaal 90° en verticaal 18° uitzendt, omdat ik weet dat deze bestaan⁽⁸⁾. In het plaatje zijn horizontaal en verticaal verduidelijkt met een poppetje.



Afbeelding 18: Geluidsverspreiding van een line-array luidspreker.

Als je de oppervlakte wil gaan berekenen, moet je van een plat vlak uitgaan. Je berekent grootte van deze oppervlakte door de breedte keer de hoogte te doen.

De breedte is simpel: **afstand*2*TAN(Hoek horizontaal/2)**

De hoogte is iets anders: je zou verwachten dat het dezelfde formule is, met de verticale hoek, maar dat is het niet. Als je dat zou doen dan ga je er vanuit dat het geluid uit een punt komt. Dat klopt wel bij gewone luidsprekers, maar niet bij Line Array: het geluid komt uit een lijn. In afbeelding 18 zie in het groen waar het geluid vandaan komt.

De hoogte bereken je zo: **Beginhoogte + afstand*2*TAN(Hoek verticaal / 2)**

Als ik dit ga uitwerken, krijg ik (ik ben uitgegaan van een beginhoogte van 1 m):

Breedte = afstand*2*TAN 45 = afstand*2

Hoogte = 1 + afstand*2*TAN 18 = 1 + afstand*0,317

Oppervlakte = (afstand*2)*(1 + afstand*0,317)

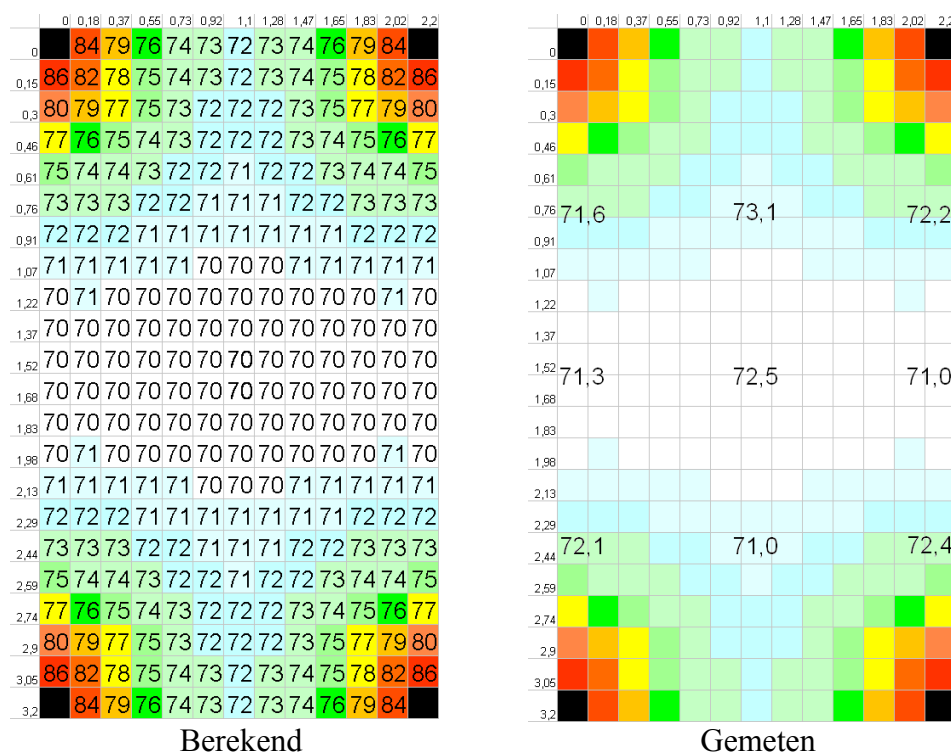
Ik wil een gewone luidspreker vergelijken met een line-array. Ik ga daarom berekenen hoe de luchtoppervlakte toeneemt met de afstand tot de bron. De bronnen zijn in dit geval een gewone luidspreker en line array. Als de afstand tot de luidspreker verdubbelt, verviervoudigt de luchtoppervlakte bij een gewone luidspreker. Bij een line array is dat niet zo. Bij line array neemt de geluidsintensiteit minder snel af. De resultaten van deze berekening staan in tabel 6.

Tabel 6: Vergelijking tussen de lucht-oppervlakte van een gewone luidspreker en die van een line-array.

Formule:	$= 4\pi \cdot \text{afstand}^2$	$= (\text{afstand} \cdot 2) \cdot (1 + \text{afstand} \cdot 0,317)$
Afstand tot de bron m	Lucht-oppervlakte (luidspreker) m ²	Lucht-oppervlakte (Line Array) m ²
0	0,0	0,0
1	12,6	2,6
2	50,3	6,5
3	113,1	11,7
4	201,1	18,1

5.5 Experiment met geluidsverdeling

Dit heb ik in de woonkamer getest.



Afbeelding 19: Geluidsverdeling met 4 luidsprekers. Links berekend, rechts gemeten waarden (de kleuren komen uit de berekeningen).

Verklaring voor het verschil, tussen de berekende en de gemeten waarden: bij de berekening ben ik uitgegaan van een vrij veld, in praktijk reflecteren niet alleen de vloer en het plafond, maar ook de muren en een grote houten kast. Hier houdt de berekening geen rekening mee. Ik heb geprobeerd om andere formules te gebruiken, maar een formule maken waarin ik ongeveer dezelfde waarden kreeg, bleek niet zo eenvoudig. Dit is me niet gelukt.

Conclusies en aanbevelingen

Line-array systemen geven een goede geluidsverdeling, en zijn daardoor relatief energiezuinig. Als je geen line-array kunt betalen dan kun je beter veel luidsprekers in je ruimte verspreiden, dit geeft ook een goede geluidsverdeling. En bij een goede geluidsverdeling hoeft het geluid nergens zo hard te zijn dat je er doof van wordt.

Het is schokkend dat luidsprekers zo'n laag rendement hebben. Bij versterkers verschilt het rendement per type: hoge kwaliteit versterkers hebben een laag rendement. Het rendement van een versterker gaat heel hard omhoog als je hem harder zet.

Als je op een professionele manier met geluid bezig bent is het beter een wat duurdere dB-meter te kopen. Het apparaatje dat ik heb gekocht (€ 90) heeft een gevoeligheidsdrempel van 30 dB en dat is best hoog. Nog duurdere dB-meters hebben een gevoeligheidsdrempel van 0 dB of lager, en dan heb je een dB-meter die gevoeliger is dan het menselijk oor, en kun je nog meer geluid meten.

Nawoord

Ik ben er achter gekomen dat ik nog veel verder kan gaan met mijn onderzoek en experimenten naar geluid en alles wat daarmee te maken heeft. Dan had ik bijvoorbeeld het experiment dat in paragraaf 5.5 is uitgewerkt met meer meetpunten, en ook dichterbij de luidsprekers kunnen meten. Dan had ik theorie (de berekeningen) en praktijk nog beter met elkaar kunnen vergelijken. Voor dit profielwerkstuk is dit een te grote tijdsinvestering om “er even bij te experimenteren”.

Volgende keer wil ik ook een experiment doen in een gymzaal met line-array luidsprekers. Dan moet ik die wel hebben natuurlijk. Tot die tijd zal ik hier alleen nog maar van kunnen dromen.

Literatuur

- 1 Systematische natuurkunde – J.W. Middelink, F.J. Engelhard, Van Walraven, Apeldoorn, 1992.
- 2 Wikipedia http://nl.wikipedia.org/wiki/Wegingscurves_A_en_C
- 3 Wikipedia <http://nl.wikipedia.org/wiki/Lawaaidoofheid>
- 4 Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Loud_music#Excessive_drinking
- 5 Binas (VMBO) – G. Verkerk e.a., Noordhoff Uitgevers, Goningen, 2008.
- 6 Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Loudspeaker#Efficiency_vs._sensitivity
- 7 Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Line_array
- 8 Bax-Shop <http://www.bax-shop.nl/line-array/qsc-kla-12-actieve-12-line-array-luidspreker/product-details.html> / <http://www.bax-shop.nl/actieve-subwoofer/qsc-kla-181-actieve-line-array-subwoofer/product-details.html>

Bijlage: foto's van verschillende experimenten.



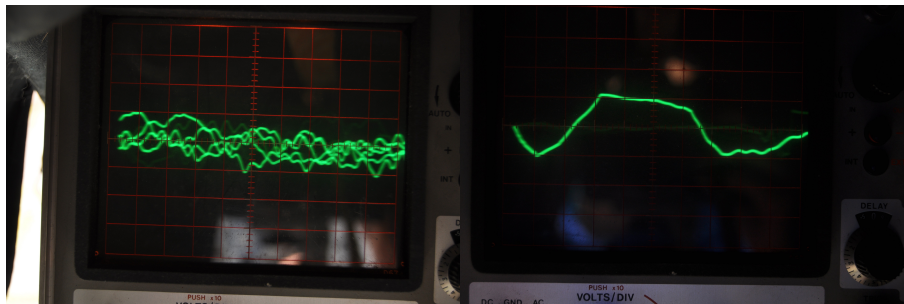
Afbeelding 20: Het eerste experiment voor het meten van het rendement van een luidspreker. Midden onder zie je de oscilloscoop, daarboven de dB-meter, en links boven de luidspreker. Dit gebeurde binnen, tot ik er achter kwam dat de muren geluid weerkaatsten.



Afbeelding 21: Het experiment voor het meten van de geluidsverdeling. Ieder statief is een meetpunt, daar wordt de dB-meter op gehouden.



Afbeelding 22: Het tweede experiment voor het meten van rendement. Deze keer buiten, met dB meter, oscilloscoop, en Watt-meter. Omdat er 3 meetinstrumenten zijn, had ik nog een derde persoon nodig. Fabian, een vriend van mij, zit op de stoel met de dB meter, en een gehoorbeschermer, omdat hij aan de hoogste geluidsintensiteiten blootgesteld zal worden.



Afbeelding 23: Spelen met fraaie geluiden op de oscilloscoop. Links is een rustig stukje dubstep, rechts is trance: de eerste “boem” uit DJ Tiesto – Ten seconds before sunrise.