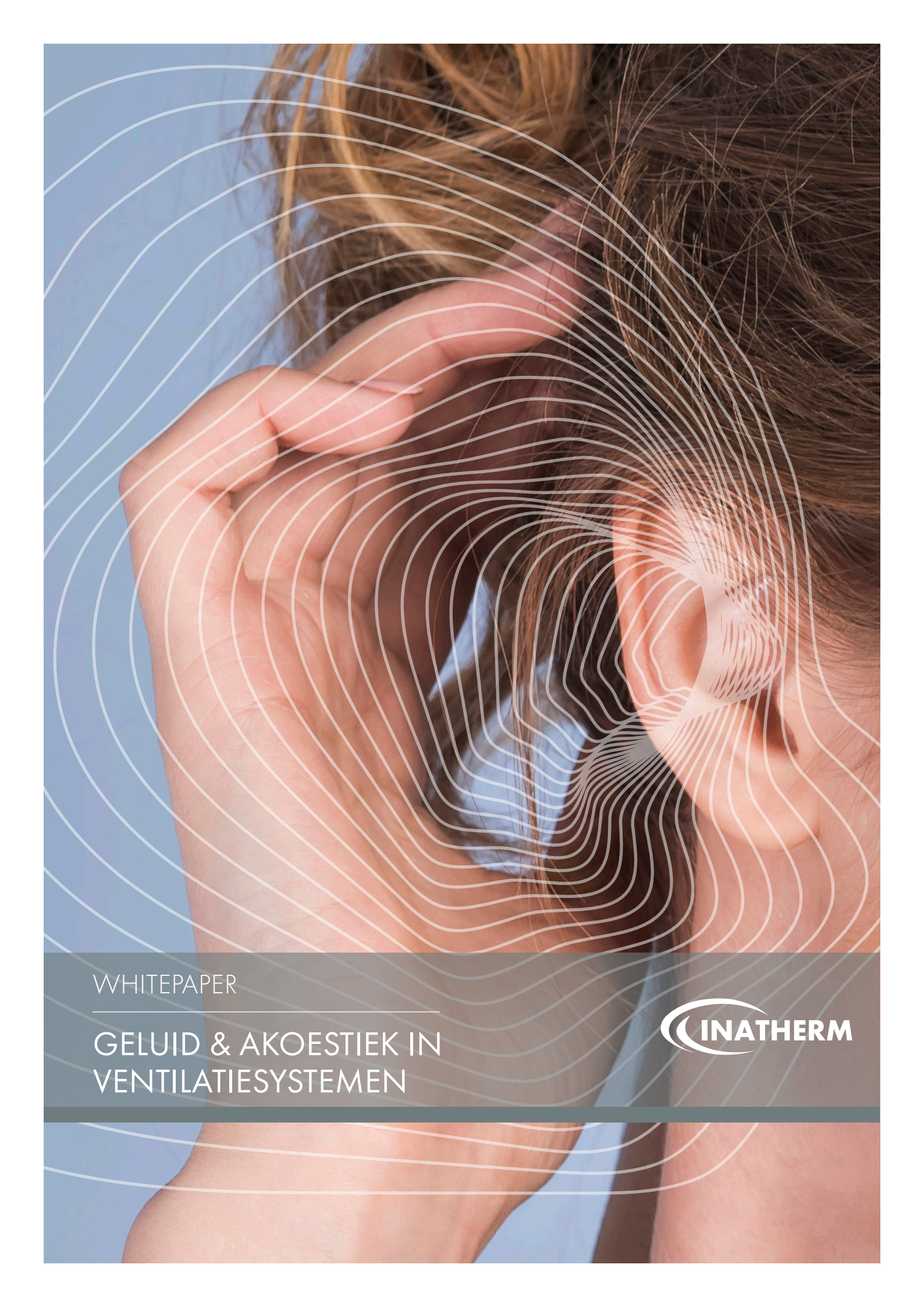




WHITEPAPER

GELUID & AKOESTIEK IN
VENTILATIESYSTEMEN





Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, kopie, scan, film of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming te hebben ontvangen (per mail aan te vragen via info@hcgroep.com).

©Inatherm | versie 1.1 - april 2023 | www.hcgroep.com | www.inatherm.nl

INHOUD

INLEIDING	5	REKENEN MET GELUIDSBRONNEN	19
GELUIDSBRONNEN	6	OPTELLEN VAN IDENTIEKE GELUIDSBRONNEN	19
VENTILATOREN	6	OPTELLEN VAN NIET IDENTIEKE GELUIDSBRONNEN	19
KANAALSYSTEMEN	6	AFTREKKEN VAN GELUIDSBRONNEN	19
ROOSTERS, REGELKLEPPEN EN OVERIGE APPENDAGES	6	BEREKENEN VAN GELUIDSDRUKNIVEAU	19
HET GEBOUW EN DE OMGEVING	6	VOORBEELDBEREKENING TWEE GELIJKE ROOSTERS IN EEN RUIMTE	20
EENHEDEN	7	VOORBEELDBEREKENING TWEE ONGELIJKE ROOSTERS IN EEN RUIMTE	21
GELUIDSDRUKNIVEAU, $L_p(A)$	7	VERDELING VAN GELUIDSNIVEAU VAN VERSCHILLENDE GELUIDSBRONNEN IN EEN RUIMTE	22
GELUIDSVERMOGENNIVEAU, $L_w(A)$	7	KERNGETALLEN BIJ GELUID IN LUCHTBEHANDELINGSINSTALLATIES	23
OCTAAFBANDEN	7	GELUIDSNIVEAU IN GEBOUWEN	23
A-WEGING	7	MAXIMALE SNELHEDEN IN LUCHTBEHANDELINGSINSTALLATIES	24
NR-CURVEN	8	GELUIDDEMPERS	25
GELUID IN EEN RUIMTE	9	WERKING EN OPBOUW VAN EEN GELUIDDEMPER	25
GELUIDSFACTOREN	9	HET MAKEN VAN EEN GELUIDSBEREKENING MET GELUIDDEMPERS	27
GELUIDSABSORPTIE	9	VOORBEELDBEREKENING GELUIDDEMPER	28
NAGALMTIJD	11	CONTACTINFORMATIE	31
RUIMTEDEMPING	11		
GELUIDSDRUKNIVEAU IN EEN RUIMTE	12		
RICHTINGSFACTOR	13		
GELUIDSISOLATIE MATERIALEN EN CONSTRUCTIES	13		
GELUID NAAR OMGEVING	15		
WETTELIJK KADER	15		
GELUIDSVERMOGEN NAAR DE OMGEVING BIJ EEN BUITEN	15		
OPGESTELDE LUCHTBEHANDELINGSKAST	15		
BEREKENEN VAN GELUIDSNIVEAU OP AFSTAND	16		



ONDERZOEKSGEBOUW VU - AMSTERDAM
GELUIDDEMPERS INWENDIG VOORZIEN VAN COATING

INLEIDING

Met geluid wordt vaak ongewenst geluid bedoeld. Geluid in een ventilatiesysteem of specifiek veroorzaakt door een luchtbehandelingskast (LBK) of WTW-unit is een uiterst complex en diffuus verschijnsel. Er zijn meerdere bronnen, welke goed dienen te worden geselecteerd en waarvan de gegevens goed geïnterpreteerd dienen te worden om een juiste selectie te maken of om geluidsdemping aan te kunnen brengen. Naast de ventilatoren (los of als onderdeel van een LBK) kunnen het kanaalsysteem, kleppen, appendages en roosters bijdragen aan het ontstaan van (ongewenst) geluid.

In deze whitepaper wordt nader ingegaan op het fenomeen geluid in luchtbehandelingssystemen. Het doel hiervan is om uitleg te geven over de diverse eenheden die betrekking hebben op geluid, de factoren die invloed hebben op geluid te benoemen en om praktische voorbeelden te geven. Deze whitepaper zal helpen met situaties in de dagelijkse praktijk van een engineer die werkt met luchtbehandelingsinstallaties voorkomen. Geluid kent een logaritmische verdeling waardoor absolute waarden vaak ver uit elkaar liggen en berekeningen niet eenvoudig zijn. Om dit whitepaper laagdrempelig te houden en eenvoudig te interpreteren wordt er niet te diep ingegaan op logaritmes en het rekenen hiermee, maar worden er voorbeelden gebruikt met benaderingsberekeningen en vereenvoudigde formules.

INATHERM

Inatherm is één van Nederlands meest bekende en vooruitstrevende leveranciers van hoogwaardige en duurzame binnenklimaatoplossingen.

Reeds vanaf 1968 is Inatherm gespecialiseerd in onder andere energiezuinige ventilatoren, inductieunits, kanaalverwarmers en -koelers, luchtdichte kanaalcomponenten, modulaire luchtbehandelingskasten en compacte WTW-units. Met dit complete programma van uitsluitend A-labels garandeert Inatherm de beste productkwaliteit, voorzien van uitgebreide documentatie.

Dankzij de jarenlange kennis en ervaring op het gebied van ventilatie en luchtbehandeling, is Inatherm in staat om haar relaties in vrijwel ieder marksegment, van ontwerpfase tot en met oplevering, volledig te ontzorgen.

WWW.INATHERM.NL



GELUIDSBRONNEN

Wanneer we het hebben over geluidsbronnen in een ventilatiesysteem dan kunnen deze in ruwweg een viertal hoofdcategorieën worden onderverdeeld:

VENTILATOREN

Geluid van ventilatoren wordt verdeeld in aerodynamisch geluid en bedrijfsgeluid. Aerodynamisch geluid is een functie van de volumestroom en druk. Het geluidsvermogen van ventilatoren wordt vaak opgegeven door de leverancier of producent. Het is afhankelijk van het debiet en de opvoerhoogte en wordt uitgedrukt in L_w in dB per octaafband. Het toerental van een ventilator heeft een relatie met het geluidsvermogen, maar hiervoor is geen algemene aanname te doen. Immers is het sterk afhankelijk van bijvoorbeeld het type en de constructie van een waaijer. Er kan dus niet worden gesteld dat een ventilator met een lager toerental dan een andere ventilator bij dezelfde luchthoeveelheid en druk altijd minder geluid maakt. Het is echter wel zo dat een ventilator minder geluid gaat maken wanneer deze op een lager toerental draait. Als stelregel kan worden aangenomen dat er een reductie van ongeveer 15 dB zal zijn bij halvering van een toerental.

Het bedrijfsgeluid van een ventilator is geluid dat wordt geproduceerd door onder andere de motor, aandrijfverbindingen en lagers.

KANAALSYSTEMEN

Het geluid in kanaalsystemen wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door lucht die langs scherpe randen, regelkleppen, geleidebladen, zadelstukken en bochten stroomt. Wanneer lucht hier langs- of tegenaan stroomt ontstaat er turbulentie en daardoor geluid. Kanalen kunnen tevens secundair geluid transporteren doordat ze het geluid van de ene naar de andere ruimte overbrengen (overspraak).

ROOSTERS, REGELKLEPPEN EN OVERIGE APPENDAGES

Geluid kan ontstaan bij roosters, regelkleppen en appendages doordat lucht door relatief kleine openingen stroomt. Geluid bij roosters is vaak een resultaat van snelheid en stromingsgeluid afhankelijk van de luchthoeveelheid en de constructie van het rooster. Ook kunnen lassen, lekkages of vibraties geluid veroorzaken.

HET GEBOUW EN DE OMGEVING

Het gebouw kan nou een oorzaak spelen bij het produceren of doorgeven van geluid, hiermee wordt vaak geluid bedoeld dat wordt doorgegeven via vloeren, muren of andere elementen van een gebouw (contactgeluid).



EENHEDEN

Bij het fenomeen geluid worden verschillende eenheden gebruikt. Hieronder worden de eenheden benoemd en nader toegelicht.

GELUIDSDRUKNIVEAU $L_p(A)$

Met het geluidsdrukniveau, dat in decibel (dB) wordt gemeten, wordt de waarneming van geluid uitgedrukt. Vaak gemeten op een bepaalde afstand van de bron en/of bij een bepaalde hoeveelheid ruimtedemping.

GELUIDSVERMOGENNIVEAU, $L_w(A)$

Met het geluidsvermogen, dat in dB wordt gemeten, wordt het geluidsvermogen uitgedrukt dat wordt afgegeven door een bron.

OCTAAFBANDEN

Het gehoor van mensen is in staat om frequenties te detecteren tussen ongeveer 20 en 20.000 trillingen per seconde (Hz). Om deze frequenties te meten en te analyseren, worden ze opgedeeld in octaafbanden met middenfrequenties van 31, 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000 en 16.000 Hz. De breedte van een octaafband is doorgaans ongeveer 70% van de middenfrequentie. Door gebruik te maken van de middenfrequenties tussen 31 en 16.000 Hz wordt het gehele hoorbare frequentiebereik gedekt. De octaafbanden die bij deze verdeling worden gebruikt, worden vaak aangeduid als de middenfrequentie van een gegeven band (fm). Voor praktische toepassingen, zoals de berekening en beoordeling van geluid van luchtbehandelingsinstallaties, is het echter voldoende om de octaafbanden tussen 63 en 8.000 Hz te gebruiken (zoals hieronder).

fm (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
---------	----	-----	-----	-----	------	------	------	------

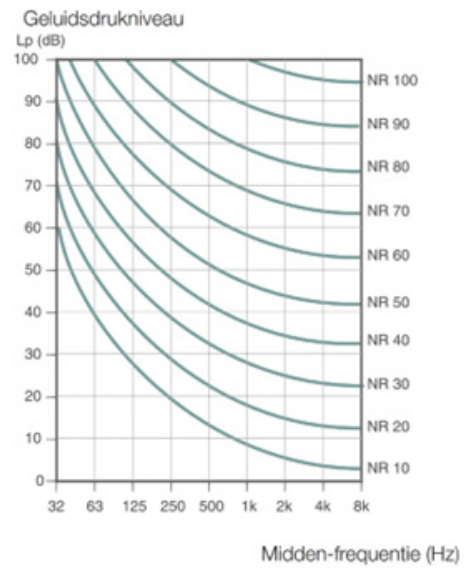
A-WEGING

Twee geluidsdrukken die dezelfde sterkte hebben, maar een verschillende frequentie worden door de mens als niet identiek ervaren. Het is echter mogelijk om de individuele frequenties vergelijkbaar te maken door een juiste correctie (A-filter) van het lineaire geluidsdrukniveau. De bereikte waarde is het A-gewogen geluidsdrukniveau $L_p(A)$, de som van de gecorrigeerde geluidsdruk niveaus in de individuele octaafbanden. Per octaafband kan er middels een A-correctie het brongeluid L_w worden gecorrigeerd tot een dB(A) waarde, hiervoor worden de volgende correctiewaarden per octaafband gebruikt:

fm (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A-correctie	-26	-16	-9	-3	-1	0	+1	+1

NR-CURVEN

Naast een door het A-filter gecorrigeerd geluidsdrukniveau (LpA) zijn er andere mogelijkheden om ongelijkwaardige waarnemingen van het oor van meerdere geluidsniveaus te compenseren. Een grafiek met Noise Rating (NR) curven geeft de geluidsdruk en frequentie per octaafband weer. De waardes op de curven kunnen door het oor gelijk worden waargenomen als zij hetzelfde NR-niveau hebben. Bijvoorbeeld 70 dB bij 250 Hz wordt hetzelfde waargenomen als 53 dB bij 4.000 Hz (zie Figuur 1). Voor het omzetten van dB(A) naar NR kan er globaal worden gerekend met -5.



Figuur 1: NR Curven

GELUID IN EEN RUIMTE

Wanneer men het heeft over geluid van een luchtbehandelingsinstallatie heeft men het vaak over het resultaat van diverse bronnen in een ruimte. Hiervoor zijn een aantal factoren belangrijk welke in deze paragraaf nader worden toegelicht.

GELUIDSFACTOREN

Geluid in een ruimte is niet altijd identiek, maar afhankelijk van een viertal factoren:

- Geluidsvermogen (geluidssterkte van de bron)
- Aantal geluidsbronnen
- Afstand tot de geluidsbron
- Hoeveelheid geluidsabsorptie in een ruimte

Het directe geluid van een geluidsbron is dichtbij nog heel sterk en wordt hierdoor bepaald door de afstand tot deze geluidsbron. Echter wanneer de afstand groter wordt, is het directe geluid van de geluidsbron niet meer zo sterk en wordt de bijdrage van de reflecties binnen de ruimte van groter belang. Het geluidsniveau hangt dan niet meer af van de afstand tot de bron: er ontstaat een evenwicht tussen door de bron toegevoerde energie en de door geluidsabsorptie afgevoerde energie. In formulevorm is dit:

$$L_P = L_w + 10 \lg \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right)$$

Waarin:

- L_P = Geluidsdrukniveau (dB(A))
- L_w = Geluidsvermogeniveau (dB(A))
- r = Afstand tot de geluidsbron (m)
- A = Absorptieoppervlakte (m²)

GELUIDSABSORPTIE

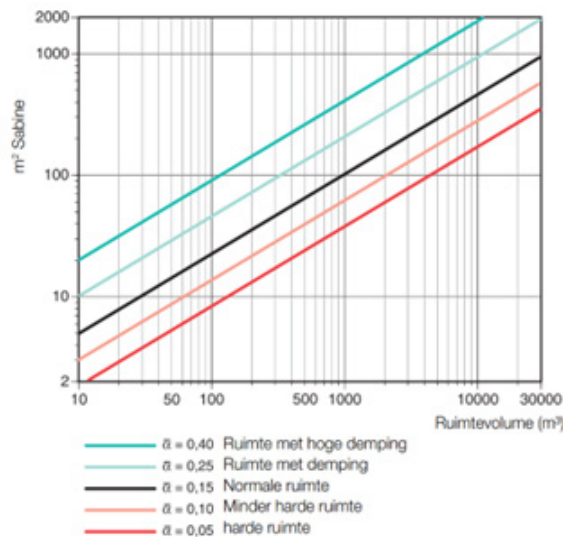
De mogelijkheid van een materiaal om geluid te absorberen wordt weergegeven als absorptiefactor. De absorptiefactor heeft een waarde tussen 0 en 1, waarbij 1 een volledig absorberend oppervlak betreft en 0 een volledig reflecterend oppervlak. De absorptiefactor van een materiaal hangt af van eigenschappen van een materiaal en kunnen in speciale tabellen worden afgelezen. Vaak worden deze gegeven in productspecificaties van bijvoorbeeld (systeem) plafonds of vloerafwerkingen. De vergelijkbare absorptieoppervlakte(A) van een ruimte wordt gemeten in m² en kan worden verkregen door het optellen van de oppervlakten in een ruimte en deze te vermenigvuldigen met de verwachte absorptiefactoren. In formulevorm is dit:

$$AEQV = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots \alpha_n \cdot S_n$$

Waarin:

- AEQV = Equivalente absorptie oppervlakte (Sabine) (open raam)
- α = Absorptiefactor afhankelijk van materiaal (opgave fabrikant of tabel)
- n = Aantal oppervlakten

Vaak is het gemakkelijker om een doorsneewaarde te nemen voor verschillende typen ruimten door een grove schatting van het absorptieoppervlak te nemen. Dit kan met behulp van onderstaande grafiek:



Figuur 2: bepaling van het vergelijkbaar absorptie oppervlak

Ook is het mogelijk om het absorptieoppervlak van een ruimte te berekenen aan de hand van de inhoud van de ruimte en de nagalmtijd. In formulevorm is dit

$$A = \frac{V}{6T}$$

Waarin:

A = Absorptieoppervlak (m^2)

V = Volume ruimte (m^3)

T = Nagalmtijd ruimte (sec)

NAGALMTIJD

Nagalmtijd wordt beschouwd als de tijd waarbinnen het niveau van een geluidspuls in een ruimte met 60 dB afneemt. Van een ruimte kan de nagalmtijd worden gemeten of worden berekend met de formule van Sabine:

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{A}$$

Waarin:

T = Nagalmtijd (s)

V = Volume van de ruimte (m³)

A = Absorptieoppervlak

Nagalmtijd en geluidsabsorptie zijn beiden frequentie afhankelijk en worden per octaafband bepaald. In onderstaande tabel worden aanbevolen referentienagalmtijden van diverse soorten ruimten gegeven:

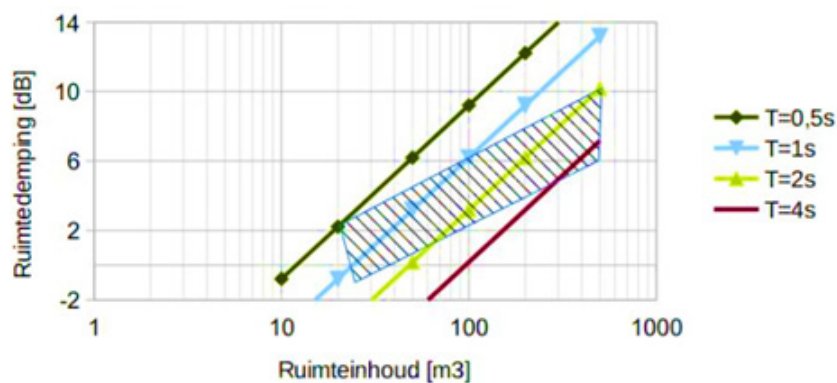
Ruimte	Nagalmtijd (s)
Geluidstudio	0,4
Kantoor	0,5
Woonkamer	0,6
Klaslokaal	0,6 - 0,8
Bioscoop	0,7 - 0,9
Vergaderzaal	0,7 - 1,1
Theater	1,1 - 1,4
Concertzaal	1,7 - 2,3
Kerk	1,4 - 2,6

Tabel 1: referentienagalmtijden van verschillende typen ruimten

RUIMTEDEMPING

Ruimtedemping wordt uitgedrukt in dB en is afhankelijk van de totale geluidsabsorptie van een ruimte. Ruimtedemping kan worden berekend uit de totale geluidsabsorptie van een ruimte, waarvan de eenheid Sabine is. Een vierkante meter van 100% absorberend materiaal heeft de waarde van 1 Sabine en wordt ook wel open raam genoemd.

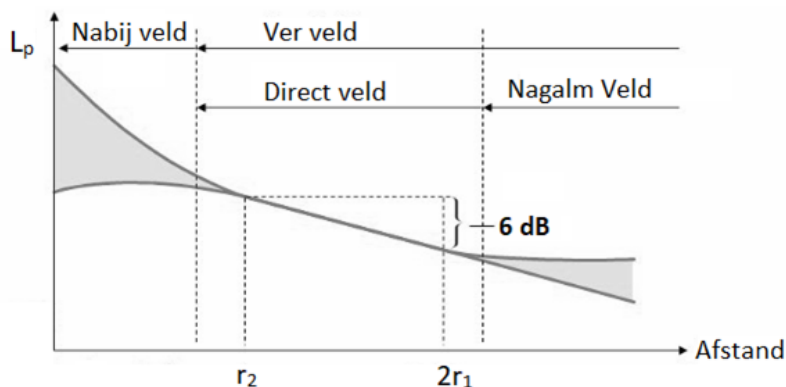
Er is een relatie tussen het volume van een ruimte, de nagalmtijd en ruimtedemping. In Figuur 3 wordt met het gearceerde gebied de praktijk aangegeven waarbij de onderste begrenzing ruimten met weinig absorptie en de bovenste begrenzing ruimten met veel absorptie.



Figuur 3: ruimtedemping en nagalmtijd

GELUIDSDRUKNIVEAU IN EEN RUIMTE

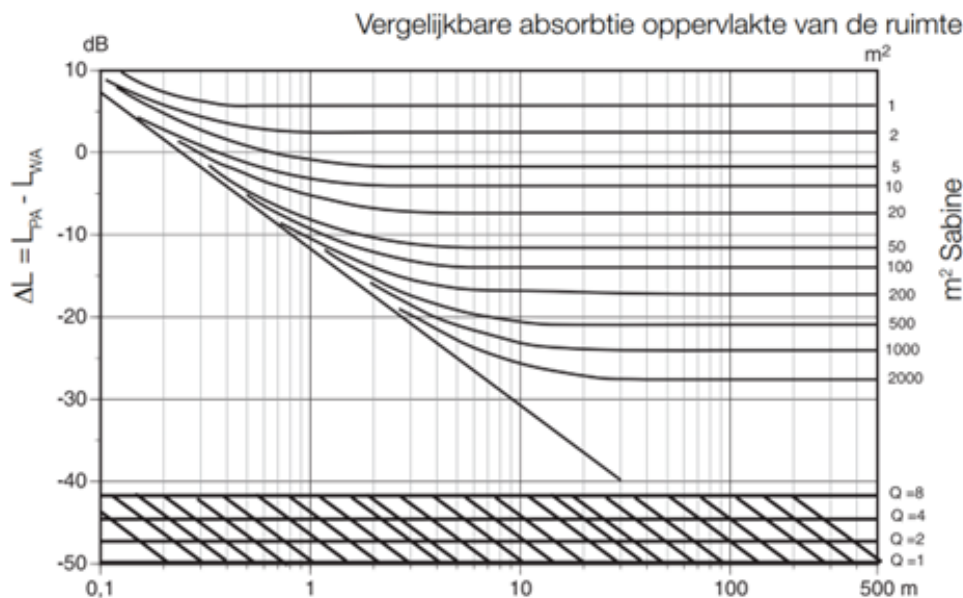
Wanneer er van een geluidsbron een geluidsvermogen niveau bekend is kan er een geluidsdrumniveau in een ruimte worden bepaald door de ruimtedemping van het geluidsvermogen niveau af te trekken. Zoals eerder gesteld word ruimtedemping uitgedrukt in dB. In veel gevallen is de afstand tussen geluidsbron en ontvanger zo groot dat directe straling (direct veld) geen rol speelt, belangrijker is dan het nagalm veld. De diverse velden worden in onderstaande figuur 4 weergegeven:



Figuur 4: geluidsuitbreiding in een ruimte: velden

In open lucht is enkel geluidstraling van belang, waarvan de mate van intensiteit afneemt wanneer de afstand tot de bron groter wordt. Bij voldoende afstand tot de bron geldt dat de afname van het geluidsdrumniveau 6 dB per verdubbeling van de afstand bedraagt.

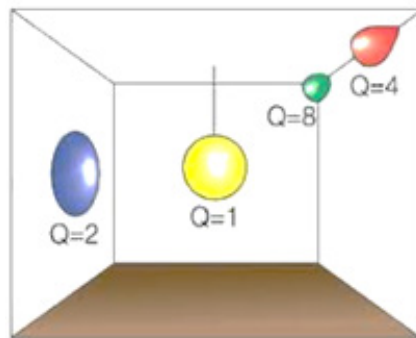
Naast het berekenen van het geluidsdrumniveau kan deze ook eenvoudig worden bepaald met behulp van een grafiek (zie hieronder). Begin met de afstand tot de geluidsbron (r in m) en volg de schuine lijn naar boven tot aan het snijpunt met de richtingsfactor (Q). Volg vervolgens de punt recht naar boven tot het snijpunt met de lijn van het vergelijkbare absorptieoppervlak. Door daarna dit snijpunt naar de linkerzijde te trekken kan het verschil tussen geluidsvermogen en geluidsdruk worden verkregen. Het resultaat kan bij het geluidsvermogen niveau worden opgeteld.



Figuur 5: bepaling van het geluidsdrumniveau

RICHTINGSFACTOR

De richtingsfactor (Q) geeft de geluidsverdeling rond een geluidsbron. Een patroon in alle richtingen (bolvorming) wordt weergegeven als $Q = 1$, een patroon in het midden van een wand of plafond heeft een halfvormige verdeling, $Q = 2$, bij $Q = 4$ bevindt de bron zich tussen wand en plafond en bij $Q = 8$ bevindt de bron zich in de hoek. In onderstaand figuur wordt de geluidsverdeling van een geluidsbron weergegeven.



Figuur 6: geluidsverdeling van een geluidsbron

GELUIDSISOLATIE MATERIALEN EN CONSTRUCTIES

De geluidsisolatie van een materiaal of constructie verwijst naar de mate waarin het in staat is om geluid tegen te houden als scheidingswand, vloerconstructie of gevel tussen twee ruimten. Voorbeelden hiervan zijn onder andere een scheidingswand tussen twee woningen, een vloerconstructie tussen een technische ruimte en kantoren, een scheidingsconstructie tussen twee kantoren of een gevel.

Over het algemeen wordt een hoge geluidsisolatie geassocieerd met een grote massa, zoals stenen of betonnen vloeren en wanden. Toch bestaan er ook slimme, lichte constructies die een vergelijkbare hoge geluidsisolatie bieden, zoals meervoudig samengestelde wanden van gipsplaten of staal. Omkastingen van ventilatoren of aggregaten die geluidwerend zijn, bestaan meestal uit een geluidsisolerende omhulling in combinatie met een goede geluidsabsorberende bekleding aan de binnenkant. In situaties waar zeer hoge geluidsisolatiewaarden nodig zijn, zijn zwevende vloeren en doos-in-doos-constructies noodzakelijk. Deze worden bijvoorbeeld toegepast bij technische ruimten met grote installaties, koelmachines en studio's.

Er zijn geluidsisolatiewaarden voor veel materialen en constructies bekend (zie bijvoorbeeld ISSO-24). Deze waarden zijn vaak gebaseerd op laboratoriummetingen. In de praktijk worden doorgaans iets lagere waarden bereikt, bijvoorbeeld als gevolg van uitvoeringsproblemen of geluidsoverdracht via omwegen, ook wel flankerende geluidsoverdracht genoemd.



MINDLABS - TILBURG

GELUID NAAR OMGEVING (BUITEN)

In veel gevallen staan delen van luchtbehandelingsinstallaties buiten opgesteld (zoals ventilatoren, luchtbehandelingskasten en koelmachines). Ook monden aanzuig- en afblaaskanalen vaak uit in de buitenlucht zoals bij dakkappen en afblaas- en aanzuigroosters. Vaak worden hiervoor ook grenzen gesteld aan de hoeveelheid geluid die deze installaties mogen produceren. In deze paragraaf gaan we nader in op geluid in de omgeving.

WETTELIJK KADER

De Wet Geluidshinder en de Wet Milieubeheer stellen wettelijke grenzen aan het geluid dat bedrijven/inrichtingen aan hun omgeving mogen afgeven. Hoewel de Wet Geluidshinder zich primair richt op lawaai van wegverkeer en grote industriële bedrijven, vallen de meeste gevallen onder de Wet Milieubeheer en de Algemene maatregelen van bestuur, zoals het Besluit detailhandel en ambachtsbedrijven, het Besluit woon- en verblijfsgebouwen en het Besluit opslag- en transportbedrijven. Als een bedrijf/inrichting voldoet aan de criteria van een besluit, moet het aan alle voorschriften voldoen die in dat besluit staan. De uitbater van het bedrijf of pandeigenaar van een inrichting moet bij de gemeente een melding doen van de oprichting of wijziging van de inrichting en impliciet aangeven dat hij voldoet of zal voldoen aan de voorschriften in het besluit. De geluideisen voor installaties zijn in de verschillende besluiten vrijwel identiek. De gemeente kan aanvullende eisen stellen, zoals het overleggen van een akoestisch onderzoek om aan te tonen dat aan de voorschriften wordt voldaan, of strengere of minder strenge voorschriften opleggen als dat nodig is vanwege lokale omstandigheden.

In onderstaande tabel 2 worden de diverse eisen die door het Besluit woon- en verblijfsgebouwen milieubeheer aan installaties worden gesteld weergegeven.

Tijdvlak (uur)	07.00 – 19.00	19.00 – 23.00	23.00 – 07.00
Equivalent geluidsniveau op de gevel van woningen	50	45	40
Equivalent geluidsniveau in in- of aanpandige woningen	35	30	25
Maximale geluidsniveau op de gevel van woningen	70	65	60
Maximale geluidsniveau in in- of aanpandige woningen	55	50	45

Tabel 2: toegestane geluidsniveaus (dB(A)) in Besluit woon- en verblijfsgebouwen

GELUIDSVERMOGEN NAAR DE OMGEVING BIJ EEN BUITEN OPGESTELDE LBK

Hieronder is een voorbeeld uit de selectiegegevens van een Inatherm luchtbehandelingskast weergegeven waarbij er naast het geluid in de kanalen ook het geluidsniveau naar de omgeving wordt gegeven.

Geluidsvermogeniveau

Octaafband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k		Totaal	
Naar buitenluchtaanzuig kanaal	71	69	59	63	46	45	40	25	dB	62	dB(A)
Naar toevoerlucht kanaal	75	71	69	73	69	68	64	55	dB	75	dB(A)
Naar retourlucht kanaal	71	69	59	63	46	45	40	25	dB	61	dB(A)
Naar afblaas kanaal	76	71	69	74	71	70	65	56	dB	77	dB(A)
Naar de omgeving	69	63	50	46	42	37	31	30	dB	51	dB(A)

Figuur 7: geluidsvermogeniveau bij de selectie van een luchtbehandelingskast

In eerste instantie worden de geluidsniveaus per octaafband weergegeven. Vervolgens is het totale A-gecorrigeerde geluidsvermogen gegeven als resultaat van correcties die zijn toegepast per octaafband (zoals eerder uitgelegd in hoofdstuk 'eenheden').

Geluidsvermogeniveau van LBK's zijn goed met elkaar te vergelijken omdat pas bij het omrekenen naar geluidsdrukniveaus de invloed en afstand worden meegenomen. Het is bij het vergelijken van geluidsdrukniveaus daarom belangrijk dat hiervoor dezelfde uitgangspunten worden gehanteerd.

BEREKENEN VAN GELUIDSNIVEAU OP AFSTAND

Een goede manier om geluid van verschillende luchtbehandelingskasten (LBK) te vergelijken is door te rekenen vanuit geluidsvermogens. Om een idee te krijgen van het geluidsniveau op een bepaalde afstand van de LBK, moet er een geluidsdruk (L_p) worden berekend. Het geluidsdruk niveau kan worden berekend vanuit het geluidsvermogensniveau (L_w) met behulp van een eenvoudige geluidsberekening. Dit geeft een indicatie van het geschatte geluidsniveau op een bepaalde afstand van de LBK. Het werkelijke geluid op een bepaald punt wordt echter beïnvloed door factoren zoals omgevingsgeluid, locatie en windrichting.



Figuur 8: luchtbehandelingskast in buitenopstelling

Om het geluidsdruk niveau van een luchtbehandelingskast op afstand te berekenen kan de volgende formule worden gebruikt:

$$L_p = L_w - 10 \lg \left(\frac{4\pi r^2}{Q} \right)$$

Waarin:

- L_p = Geluidsdruk niveau (dB(A))
- L_w = Geluidsvermogensniveau (dB(A))
- r = Afstand tot de geluidsbron (m)
- Q = Richtingsfactor

Voorbeeld:

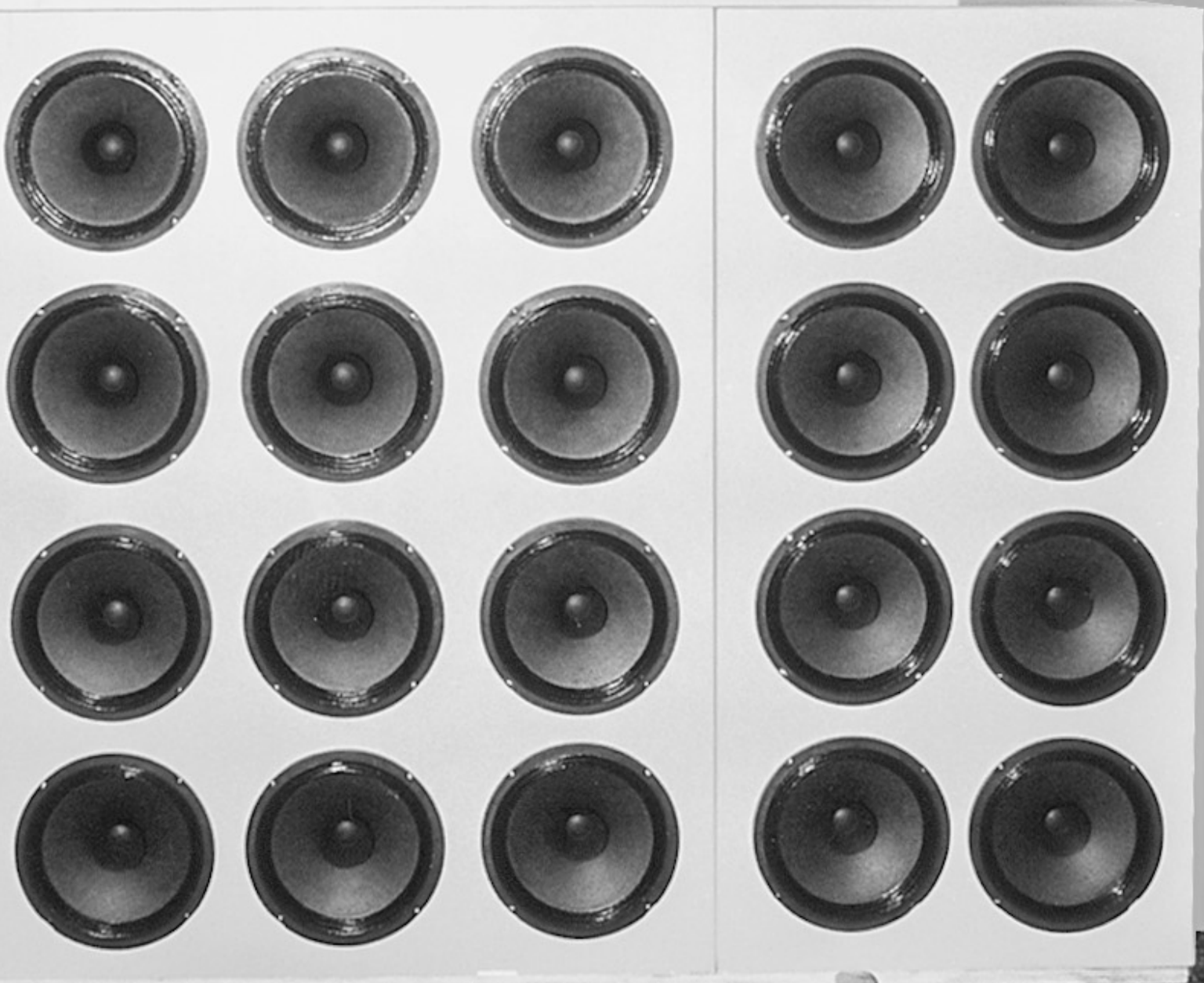
Een luchtbehandelingskast staat op een dak opgesteld zonder omliggende obstakels zoals wanden of apparatuur (zoals in Figuur 8). In dit geval is de richtingsfactor als $Q = 2$ zoals weergegeven in Figuur 6, het enige vlak is in dit voorbeeld het dak waar de luchtbehandelingskast op staat. Wanneer we nu het afgestraalde geluid van de LBK op een afstand van 10 meter en op 5 meter willen bepalen dan zou dit als volgt zijn:

$$L_p = 51 - 10 \lg (4\pi 10^2/2) = 51 - 28 = 23 \text{ dB(A)}$$

Op 5 meter afstand zou dit zijn:

$$L_p = 51 - 10 \lg (4\pi 5^2/2) = 51 - 22 = 29 \text{ dB(A)}$$





REKENEN MET GELUIDSBRONNEN

Door het logaritmische karakter van geluid is het rekenen met geluidsbronnen niet altijd eenvoudig. In deze paragraaf wordt er op een praktische manier ingegaan op het rekenen met diverse soorten geluidsbronnen.

OPTELLEN VAN IDENTIEKE GELUIDSBRONNEN

Wanneer er sprake is van twee of meerdere identieke geluidsbronnen is er sprake van een toename van het totaalgeluid. Dit is echter nooit simpel een vermenigvuldiging van de onafhankelijke geluidsproductie van bronnen. In onderstaande tabel wordt de toename in dB bij het aantal bronnen gegeven:

Aantal bronnen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Toename (dB)	0	3	5	6	7	8	8,5	9	9,5	10

Tabel 3: optellen van identieke bronnen

OPTELLEN VAN NIET IDENTIEKE GELUIDSBRONNEN

Wanneer er niet identieke geluidsbronnen worden opgeteld, dan is het verschil tussen beide bronnen bepalend voor hoeveel het totale niveau toeneemt. Deze toename dient opgeteld te worden bij het hoogste niveau.

Verskil (dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Toename (dB)	3,0	2,5	2,1	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4

Tabel 4: optellen van niet identieke bronnen

AFTREKKEN VAN GELUIDSBRONNEN

Bij het aftrekken van geluidsbronnen is het verschil (in dB) tussen beide bronnen bepalend voor het geluidsniveau. Het verschil in dB dient af te worden getrokken van het hoogste geluidsniveau.

Verskil (dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aftrekken van hoogste niveau (dB)	-	6,9	4,3	3,0	2,2	1,7	1,3	1,0	0,7	0,6	0,5

Tabel 5: aftrekken van geluidbronnen

BEREKENEN VAN GELUIDSDRUKNIVEAU

Geluidsdrukniveau kan worden berekend met behulp van de eerder beschreven factoren wanneer het geluidsvermogen niveau van een bron bekend is. De formule voor het berekenen van het geluidsdrukniveau is als volgt:

$$L_{pA} = L_{WA} + 10 \cdot \log \left[\frac{Q}{4 \pi r^2} + \frac{4}{A} \right]$$

Waarin:

- L_{pA} = Geluidsdrukniveau (dB)
- L_{WA} = Geluidsvermogen niveau (dB)
- Q = Richtingsfactor
- R = Afstand tot de geluidsbron (m)
- A = Absorptieoppervlak (m^2 Sabine)

Indien er sprake is van meerdere geluidsbronnen dient voor L_{WA} het opgetelde geluidsniveau te worden genomen.

VOORBEELDBEREKENING TWEE GELIJKE ROOSTERS IN EEN RUIMTE

In onderstaande afbeelding Figuur 9 is een deel van de selectiegegevens van een wervelrooster type Helius 1-2 van Interland Techniek gegeven. In de ruimte (kantoor) zijn twee stuks Helios 1-2-200 toegepast met ieder een luchtvolume van 200 m³/h. We lezen in de tabel een geluidsdrumniveau van 28 dB(A). In de opmerkingen wordt aangegeven dat er is gerekend met een ruimtedemping van 5 dB(A).

HELIUS-1-1 / 1-2 / 1-3 PLAFONDROOSTERS

SELECTIETABEL

HELIUS-1-1 / 1-2 / 1-3																							
grootte	125			160			200			250			315			355			400				
m³/h	Lt	Ps	Lp	Lt	Ps	Lp	Lt	Ps	Lp	Lt	Ps	Lp	Lt	PS	Lp	Lt	Ps	Lp	Lt	Ps	Lp		
50	1,3	213	<20																				
75	1,6	30	23	1,4	8	<20																	
100	1,9	53	31	1,6	15	23																	
125				1,8	23	30	1,5	9	<20														
150				1,9	34	36	1,7	12	20														
200							1,9	22	28	1,8	9	<20											
250							2,1	35	34	2	14	22											
300							2,3	50	40	2,2	20	28	1,9	7	<20								
350										2,4	27	32	2,1	10	20	1,6	10	<20					
400										2,5	36	36	2,2	13	22	1,7	13	20	1,7	9	<20		
500													2,4	21	30	1,9	21	29	1,8	13	25		
600													2,6	30	36	2	29	34	1,9	19	32		
800																			2,1	34	44		

Opmerkingen bij selectietabel:

Rooster met plenum, vereffeningsplaat en volumeregelaar 100% open.

Eindsnelheid worp 0,37m/s, resulterende snelheid in de verblijfszone <0,2m/s

Geldig bij een vertrekhoogte van 2,7 – 3,0 m, ingebouwd in een vlak plafond.

Worpgegevens zijn gebaseerd op het inblazen van gekoelde lucht met een ondertemperatuur van 10K.

In de Lp waarde is een ruimtedemping aangehouden van 5dB(A).

Legenda

Lt Worp in meters

Ps Statisch drukverlies in Pa

Lp Geluidsdruk in dB(A)

Figuur 9: selectiegegevens van een HELIUS wervelrooster

In onderstaande tabel 6 wordt de berekening gemaakt van de geluidsproductie van deze twee roosters in de ruimte. Let op: hiervoor wordt gebruikt gemaakt van Tabel 3 (optellen van identieke bronnen) en van Figuur 3 (ruimtedemping en nagalmtijd) in voorgaande hoofdstukken. Als eerste wordt het door de leverancier gegeven geluidsniveau ingevuld. Vervolgens wordt de door de leverancier opgegeven ruimtedemping opgeteld. Daarna wordt met behulp van Tabel 3 de toename erbij geteld in rij 4. Op rij 7 wordt een referentienagalmtijd van 0,5 ingevuld voor een kantoorruimte. Daarna wordt de werkelijke (verwachte) ruimtedemping in dB afgelezen in Figuur 3 en ingevuld op rij 8. Het resultaat van de berekening is een totaal geluidsniveau van 30 dB(A).

	Omschrijving	[-]	dB(A)
	<i>Te beoordelen rooster(s):</i>		
1	Opgave Lpa bij 5 dB ruimtedemping		28
2	Ruimtedemping opgave leverancier		5
3	Bronvermogen Lwa per rooster		33
4	Aantal gelijke bronnen (zie Tabel 3)	2	+3
5	Lwa totaal bij 2 gelijke roosters		36
	<i>Te beoordelen ruimte:</i>		
6	Volume V (lxbxh) = 5x4x2,5 [m³]	50	
7	Nagalmtijd T bij 500 Hz [s]	0,5	
8	Ruimtedemping [zie Figuur 3]		6
9	Geluidsniveau Lpa roosters totaal		30

Tabel 6: beoordeling totaal geluidsniveau bij twee gelijke roosters

VOORBEELDBEREKENING TWEE ONGELIJKE ROOSTERS IN EEN RUIMTE

In de volgende berekening gaan we uit van twee ongelijke roosters in een ruimte, bijvoorbeeld een wervelrooster voor de toevoerlucht en een geperforeerd rooster voor de afvoerlucht, met ieder een eigen opgave van het geluid.

Met het door de roosterleverancier opgegeven geluidsniveau per rooster wordt het geluidsvermogen berekend. Vervolgens worden deze geluidsvermogens opgeteld. Het geluidsniveau in de ruimte wordt berekend door de ruimtedemping van het totale geluidsvermogen af te trekken.

	Omschrijving	[-]	dB(A)
	<i>Te beoordelen rooster(s):</i>		
1	Rooster 1: Opgave L _{pa} bij 5 dB ruimtedemping		28
2	Ruimtedemping opgave leverancier		5
3	Bronvermogen L _{wa} van rooster 1		33
4	Rooster 2: Opgave L _{pa} bij 5 dB ruimtedemping		31
5	Ruimtedemping opgave leverancier		5
6	Bronvermogen L _{wa} van rooster 2		36
7	L _w totaal rooster 1 en 2 (33 + 36 dB(A)) (Zie tabel 4)	+1,8	37,8
	<i>Te beoordelen ruimte:</i>		
6	Volume V (lxbxh) = 5x4x2,5 [m ³]	50	
7	Nagalmtijd T bij 500 Hz [s]	0,5	
8	Ruimtedemping [zie Figuur 3]		6
9	Geluidsniveau L _{pa} roosters totaal		31,8

Tabel 7: beoordeling totaal geluidsniveau bij twee ongelijke roosters in een ruimte

VERDELING VAN GELUIDSNIVEAU VAN VERSCHILLENDE GELUIDSBRONNEN IN EEN RUIMTE

Bij het kiezen van een systeem is het belangrijk om te weten hoe geluid in een ruimte verdeeld kan worden over de verschillende geluidsbronnen, vooral als er meerdere geluidsbronnen bijdragen aan het geluidsniveau. Een voorbeeld van een ruimte met 250 m² oppervlakte, 10 toevoerroosters, 5 retourroosters en 3 constant-volumeregelaars wordt gegeven, waarbij rekening wordt gehouden met zowel de toevoerventilator als de retourventilator in de LBK. De berekeningen worden uitgevoerd met een grenswaarde van 35dB(A). De ruimtedemping wordt berekend in regel 4 en een nagalmtijd van 1,0 s wordt aangenomen voor een ruimte van die grootte. Het maximale toegestane geluidsvermogen voor alle geluidsbronnen wordt berekend in regel 6 door de grenswaarde en de ruimtedemping bij elkaar op te tellen. Vervolgens wordt er een verdeling gemaakt over de verschillende groepen geluidsbronnen. De verdeling is arbitrair en kan worden aangepast zolang de som van de geluidsvermogens in regel 16 lager is dan of gelijk aan de waarden in regel 6. Door gebruik te maken van een spreadsheet kunnen de individuele geluidsvermogens per groep van geluidsbronnen worden gevarieerd, zolang het resultaat in regel 16 niet hoger is dan de waarden in regel 6. In dit voorbeeld wordt de grootste geluidruimte toegekend aan de toevoerroosters omdat er geen mogelijkheden zijn om het geluid van de roosters zelf te verminderen met externe geluidsdemping en het daarom afhangt van een goede roosterselectie. Geconcludeerd kan worden dat het type toevoerrooster moet worden geselecteerd op een geluidsniveau van 27 dB(A) bij een ruimtedemping van 5dB.

	Omschrijving	[-]	dB(A)
	<i>Ruimte-info en criteria:</i>		
1	Grenswaarde geluid		35
2	Volume V (lxbxh) = 9x5x2,8 [m ³]	400	
3	Nagalmtijd T bij 500 Hz [s]	1,0	
4	Ruimtedemping [zie Figuur 3]		12
5	Grenswaarde geluid		35
6	Maximale toegestane totaal geluidsvermogen		47
	<i>Geluidsvermogen per bron:</i>		
7	Opgave Rooster Lpa bij 5 dB ruimtedemping		32
8	10 x identiek toevoerrooster [Zie Tabel 3] toename=10	10	42
9	Opgave Rooster Lpa bij 5 dB ruimtedemping		30
10	5 x identiek retourrooster [Zie Tabel 3] toename=7	5	37
11	Opgave CAV klep Lpa		32
12	3 x identiek CAV klep [Zie Tabel 3] toename=5	3	37
13	Toevoersysteem (ventilator in LBK)		37
14	Retoursysteem (ventilator in LBK)		37
15	Totaal (regel 8+10+12+13+14) [Zie tabel 4]		46

Tabel 8: verdeling van geluidsniveau van verschillende geluidsbronnen in een ruimte

KENGETALLEN BIJ GELUID IN LUCHTBEHANDELINGSINSTALLATIES

In een ontwerp worden vaak maximale geluidsniveaus benoemd afhankelijk van het soort gebouw of ruimte. In deze paragraaf worden enkele kengetallen genoemd voor gewenste geluidsniveaus en maximale lichtsnelheden in een luchtbehandelingssysteem.

GELUIDSNIVEAU IN GEBOUWEN

Onderstaande waarden voor geluidsniveau in dB(A) kunnen worden gebruikt als algemene indicatie voor de gewenste niveaus in een bepaalde ruimte in een bepaald gebouw.

Omschrijving	Geluidsniveau in dB(A)
Kantoorgebouwen	
Kantoren waar hoge eisen worden gesteld	30 - 35
Vergaderruimten	35
Kantoren voor algemeen gebruik	35 - 40
Kantoortuinen, tekenzalen	40 - 45
Gangen, hal, toiletruimten	40 - 45
Kantine, restaurant	40 - 45

Onderwijsgebouwen	
Klaslokalen	30 - 35 (Frisse scholen A:30, B:33, C:35)
Auditorium	30 - 35
Collegezalen	30 - 35
Bibliotheek, mediatheek, studiehuis	35 - 40
Muzieklokalen	30
Gymnastieklokalen	35 - 45
Praktijklokaal	40 - 50
Laboratorium	40 - 50
Restaurant	40 - 45

Ziekenhuizen	
Bedkamers (dag/nacht)	35/25
Onderzoekkamers	30
Behandeldkamers, operatiekamers	35
Stilteruimte, mortuarium, kapel	30
Verkeersruimten	40

Sportgebouwen	
Fitness, aerobic, sauna, solarium	40 - 45
Squash, tennis, grote gymzaal, zwembad	40 - 50
Fysiotherapie, beautyruimte	35

Woningen	
Woon- en slaapkamers (dag/avond/nacht)	35/30/25

Bijzondere ruimten	
Radio- en tv-studio's	20 - 30
Concertzalen en schouwburgen	25 - 30
College- en rechtszalen, auditoria en kerken	30 - 35
Parkeergarages	60 - 70

MAXIMALE SNELHEDEN IN LUCHTBEHANDELINGSINSTALLATIES

Snelheden van lucht hebben invloed op met name het stromingsgeluid dat wordt geproduceerd.

Onderstaande snelheden geven een indicatie voor de maximale luchtsnelheden uitgedrukt in m/s voor luchtbehandelingsinstallaties.

	Maximaal	Aanbevolen
Luchtsnelheden in luchtkanalen	3-5 m/s	3 m/s
Luchtsnelheden door een luchtbehandelingskast	1-1.8 m/s	1.6 m/s
Luchtkanalen in schachten	8 m/s	6 m/s
Hoofdkanalen op de verdieping	6 m/s	4 m/s
In aftakkingen vóór een nabehandelingsunit met geluidsdemper	6 m/s	4 m/s
In een aftakking naar een rooster	4 m/s	2.5 m/s
Idem met geluidsdempend roosterbakje	5 m/s	3 m/s
Primaire geluidsdempers bij de luchtbehandelingkast	3 m/s	2.5 m/s
Secundaire geluidsdempers in het hoofdkanaal op de verdieping	4 m/s	3 m/s
Snelheid tussen coulissen van rechthoeking dempers	7-10 m/s	7 m/s

GELUIDDEMPERS

Geluiddempers worden toegepast in een luchtbehandelingssysteem om brongeluid (van bijvoorbeeld een ventilator) te verminderen of om stromingsgeluid veroorzaakt door appendages of (onderdelen van) een kanalsysteem te verminderen. In de praktijk worden geluiddempers vaak in of dichtbij een ventilator of luchtbehandelingskast geplaatst om het brongeluid van de ventilator weg te dempen voor deze in het kanalsysteem terecht komt. Ook zijn geluiddempers (of akoestische/geluiddempende slang) vaak te vinden aan het eind van een kanalsysteem. In dat geval worden ze vaak gebruikt om (stromings)geluid van het kanalsysteem en componenten weg te dempen voor deze door een luchtverdeellement (roosters, inductieunits, etc.) in de ruimte terecht komt.

WERKING EN OPBOUW VAN EEN GELUIDDEMPER

Een geluiddemper in een luchtbehandelingssysteem werkt door het verminderen van het geluidsniveau (en dus de energie) die wordt geproduceerd door de luchtstroom die door het systeem gaat. Dit wordt bereikt door de luchtstroom te vertragen en te verdelen, waardoor het geluid geabsorbeerd wordt en gereflecteerd door dempingsmateriaal in de demper.

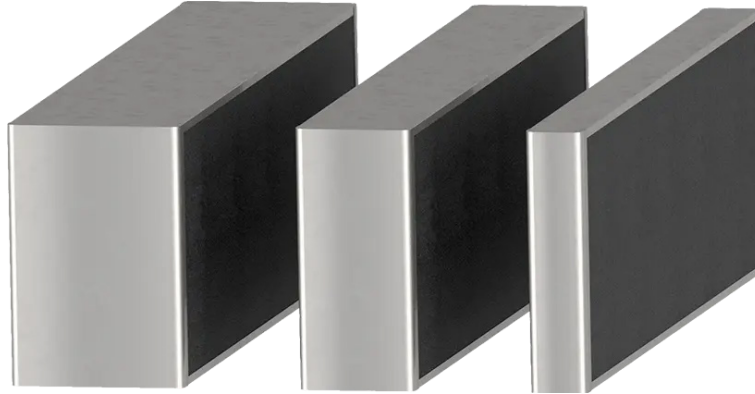
Een geluiddemper bestaat meestal uit een rechthoekige of ronde behuizing met een aantal interne componenten. Deze componenten kunnen zijn voorzien van absorptiemateriaal zoals glasvezel, steenwol, poreus schuim of een andere akoestische absorber. De luchtstroom wordt door deze absorptiematerialen geleid, waarbij de geluidsgolven in de lucht worden gedempt en geabsorbeerd door het materiaal. In het geval van rechthoekige dempers spreekt men van geluiddempende coulissen. Het aantal, de afstand, het geluiddempende materiaal en de snelheid tussen de coulissen bepaald de uiteindelijke dempingswaarden van de rechthoekige demper.



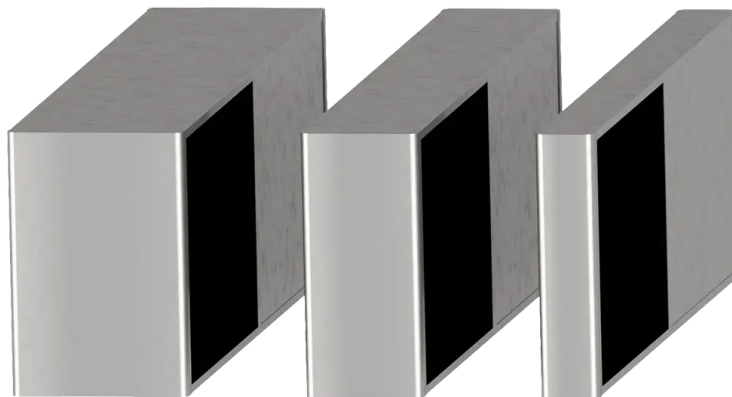
Figuur 10: rechthoekige geluiddemper met coulissen type HKR

Coulissen voor rechthoekige dempers zijn ruwweg onder te verdelen in twee soorten:

- Absorptiedempers: dempt met name in de midden en hoge frequenties
- Absorptie/resonantiedempers: dempt met name in de lage en midden frequenties



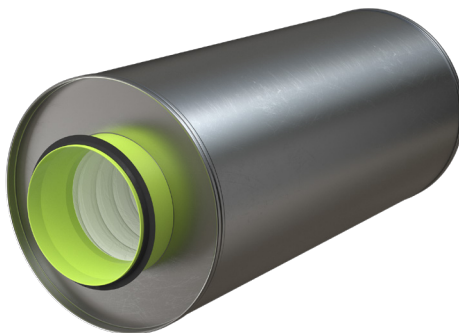
Figuur 11: absorptiedemper (coulis)



Figuur 12: adsorptie/resonantiedemper (coulis)

Afhankelijk van het type ventilator, waaijerconstructie, toerental en efficiëntie van de ventilator zal het zwaartepunt van het geluidsspectrum in het lage-, midden- of hoogfrequent gebied zitten. Hier dient dus rekening mee te worden gehouden bij de toepassing van de juiste demper.

Bij ronde geluiddempers geldt dat deze vaak worden vervaardigd met een spiraalgefelste buitenmantel of een overdwers gelastte gladde buitenmantel. De binnenzijde van de geluiddemper bestaat uit een geperforeerde binnenmantel waarbij er tussen binnen- en buitenmantel geluidsabsorberend materiaal is aangebracht. De hoeveelheid en soortmateriaal (vaak uitgevoerd met een dikte van 50 of 100 mm) bepaald de dempingswaarde van de geluiddemper. Eventueel kan er bij een ronde geluiddemper ook een ronde coulis in het midden worden voorzien voor extra demping.



Figuur 13: ronde geluiddemper met 50mm isolatie type SORDO

Over het algemeen geldt dat hoe langer en breder de demper is, hoe effectiever deze is bij het dempen van geluid (er is dan meer dempingsmateriaal aanwezig). Het ontwerp van een geluiddemper kan ook worden aangepast aan specifieke toepassingen en vereisten, zoals het beperken van drukval en het minimaliseren van de weerstand van de luchtstroom.

HET MAKEN VAN EEN GELUIDSBEREKENING MET GELUIDDEMPERS

Voor het berekenen van de juiste geluiddempers zijn de volgende gegevens benodigd:

- Brongeluid L_w per octaafband in dB
- Gewenste geluidsvermogen in dB(A) na geluiddemper
- Afstand van geluidsbron tot meetpunt
- Dempingswaarden van de te selecteren demper per octaafband

Het resultaat voor de berekening is een totaal geluidsvermogen in dB(A) en een berekende geluidsdruk (L_p) in dB(A) voor zowel vrije veld condities als tegen een vlak (situatie Q2 in Figuur 9).

VOORBEELDBEREKENING GELUIDDEMPER

Onderstaande Figuur 14 geeft een voorbeeldberekening van het resultaat na het toepassen van een geluiddemper.

	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Hz
bron Lw in dB per frequentieband	88	90	86	87	82	78	80	76	dB
A-correctie	-26	-16	-9	-3	-1	0	1	1	dB
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Hz
bron Lw in dB(A) per frequentieband	62	74	77	84	81	78	81	77	dB(A)
dempingswaarde toegepaste demper	5	13	22	45	54	47	31	20	dB(A)
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Hz
geluidsvermogen Lw in dB(A) na demping	57	61	55	39	27	31	50	57	dB(A)
Geluidsvermogen Lwtot in dB(A)									
64									
Geluidsdruk in het vrije veld Lp in dB(A)									
53									
tegen een vlak in dB(A)									
56									
afstand van bron tot meetpunt :									
1 meter									

Figuur 14: voorbeeldberekening geluid luchtbehandelingskast bij toepassen geluiddemper

Door het A-gecorrigeerde brongeluid per octaafband van de toevoer van de LBK te verminderen met de dempingswaarden van een geselecteerde geluiddemper ontstaat er een geluidsvermogen Lw in dB(A) na demping. Door de geluidsvermogenniveaus na demping per octaafband te verheffen ($\times 10$) en vervolgens logaritmisches optelling van het geluidsvermogen over alle frequentiebanden ontstaat er een totaal geluidsvermogen Lwtot in dB(A). In formulevorm is dit:

$$L_{wtot} = 10 \cdot \log \sum 10^{L_w/10}$$

Waarin:

Lwtot = Geluidsvermogen totaal (dB(A))

Lw = Geluidsvermogenniveau per frequentie (dB(A))

Vervolgens kan er met de onderstaande formule de geluidsdruk in het vrije veld worden berekend op een willekeurige afstand (r) met een richtingsfactor Q volgens figuur 9:

$$L_p = L_w - 10 \lg \left(\frac{4\pi r^2}{Q} \right)$$

Waarin:

Lp = Geluidsdruk niveau (dB(A))

Lw = Geluidsvermogenniveau (dB(A))

r = Afstand tot de geluidsbron (m)

Q = Richtingsfactor



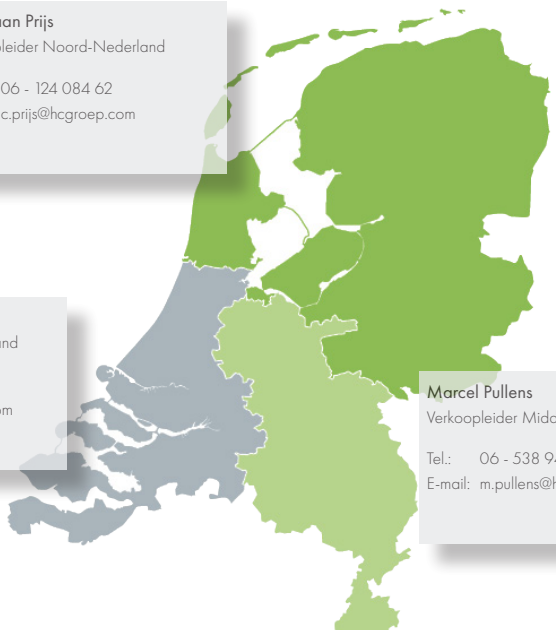


DR. MOLLERCOLLEGE - WAALWIJK
AFGESTEMD OP HET "FRISSE SCHOLEN" CONCEPT

WILT U WETEN WAT INATHERM VOOR U KAN BETEKENEN?

Bel of e-mail ons en wij komen graag bij u langs.

RAYONVERDELING



Christiaan Prijs
Verkoop leider Noord-Nederland
Tel.: 06 - 124 084 62
E-mail: c.prijs@hcgroep.com

Frank Lamers
Verkoop leider West-Nederland
Tel.: 06 - 515 449 68
E-mail: f.lamers@hcgroep.com

Marcel Pullens
Verkoop leider Midden- & Zuid-Nederland
Tel.: 06 - 538 940 76
E-mail: m.pullens@hcgroep.com

Commercieel Directeur
Peter van der Velde
Tel.: 06 - 551 110 19
E-mail: p.van.der.velde@hcgroep.com

CONTACTPERSONEN PRODUCTGROEPEN

Ventilatoren Frank Fonken Tom Absil Bert van Laarhoven	Luchtbehandeling Bert van Laarhoven Frank Fonken Tom Absil	Vochtbeheersing Roland Groffen Ronald van der Elst Peter van der Burg
Kanaalcomponenten Tom Absil Patrick van Sambeek Luc van Noije Ad Kint Max Versteeg	Temperatuurbereiding Gerard Kros Tom Absil Frank Fonken Bert van Laarhoven	Luchtverdeling Patrick van Sambeek Luc van Noije Ad Kint Max Versteeg
E-mail Inatherm inatherm@hcgroep.com Interland Techniek interlandtechniek@hcgroep.com Tel.: 0416 - 317 830		



WHITEPAPER **GELUID & AKOESTIEK** IN VENTILATIESYSTEMEN

WWW.INATHERM.NL

