

Geluidsarm construeren van ventilatiesystemen

Geluid opgewekt door luchtverplaatsing wordt een steeds belangrijker aspect bij het ontwerpen van ventilatiesystemen. De voornaamste bron van geluid was tot voor kort de ventilator. Echter, doordat ventilatiesystemen in gebouwen steeds minder ruimte mogen innemen, wordt de lucht door steeds compactere kanalen geleid. De snelheid van de luchtstroming neemt hierdoor snel toe, wat kan leiden tot hinderlijk stromingsgeluid in bochten, vertakkingen, regelkleppen, enz. Het gevolg is dat al deze geluidsbronnen extra aandacht vragen omdat zij niet meer eenvoudig zijn te isoleren van de rest van het systeem, zoals dat het geval is voor een ventilator.

Gelukkig vinden er op dit gebied wel ontwikkelingen plaats, die het mogelijk maken al in het ontwerpstadium van een ventilatiesysteem het geluid efficiënt te beheersen. Zo kunnen door een computeranalyse relatief snel verschillende ontwerpen worden geanalyseerd. Uit zulke analyses komen dan de probleempunten naar voren, waardoor al in het ontwerpstadium adequate constructieve maatregelen kunnen worden genomen.

-door ir. H.Gijrath en dr.ir. R. Parchen**

Bij het ontwerpen van gebouwen en de geplande ventilatiesystemen, dient rekening te worden gehouden met de gestelde geluidseisen in de verschillende ruimten. Afhankelijk van de functie van de ruimte (kantoor, woning, enz.) worden verschillende eisen gehanteerd voor het toegestane geluidsniveau. De indeling en constructie van het gebouw hebben een grote invloed op het ontwerp van het ventilatiesysteem. Daarom dient extra aandacht te worden besteed aan de geluidproductie en geluidsoverdracht van de ventilatoren naar de verschillende ruimten in het gebouw en de geluidsoverdracht tussen de ruimte die met elkaar in verbinding staan via het ventilatiesysteem.

Het maken van geluidberekeningen tijdens de ontwerpfase is noodzakelijk en heeft als belangrijkste doelen, te voldoen aan de geluidseisen en het beheersen van de kosten van het ventilatiesysteem, inclusief geluidreducerende maatregelen. Deze aanpak voorkomt dure modificaties ná de oplevering, indien niet aan de gestelde geluidseisen blijkt te zijn voldaan.

Er zijn een groot aantal publicaties [1] en handleidingen [2], die kunnen worden toegepast om het geluidsniveau, ten gevolge van het ventilatiesysteem, in iedere relevante ruimte te beheersen.

Voor relatief eenvoudige ventilatiesystemen, zoals schematisch in figuur 1 staat afgebeeld, kan de geluidsbereke-



De heer ir. H. Gijrath

de heer dr.ir. R. Parchen

ning snel en eenvoudig worden uitgevoerd door gebruik te maken van standaard berekeningen:

$$L_{p,n} = L_w - \sum_{i=1}^n \Delta L_{w,i} + \left[\frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A_{ref}} \right] \quad (1)$$

Voor grote gebouwen met daarin complexe ventilatiesystemen vereist het echter een significante inspanning om met deze normen het geluidsniveau in alle relevante ruimten te berekenen. Wanneer tijdens de ontwerpfase van het gebouw ook nog (herhaaldelijk) grote wijzigingen worden doorgevoerd in de indeling of constructie, is daarvoor een vergelijkbare additionele

* TNO TPD

inspanning vereist om de nieuwe geluidsniveaus te berekenen. In zulke gevallen kan gebruik worden gemaakt van geavanceerde simulatiesoftware die de gebruiker in staat stellen om zeer efficiënt complexe systemen door te rekenen [3, 4].

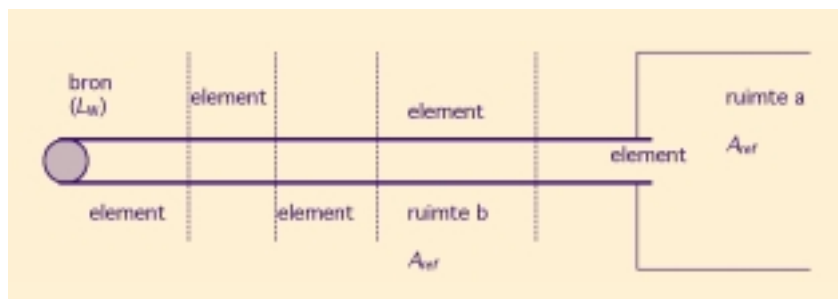
LUCHTGELUID VAN VENTILATIE-SYSTEMEN

Ventilatiesystemen bestaan overwegend uit ventilatoren, een kanaalsysteem en de uitblaas- en retourluchtopeningen voorzien van roosters. De ventilatoren produceren geluid dat o.a. wordt afgestraald door de omkasting en in het kanaal. De ventilator produceert ook trillingen, die naar de ondersteunende constructie afstralen.

Het geluid afgestraald aan de buitenkant van de ventilator is meestal te beheersen door lokale maatregelen, zoals isolatie van de ventilatorbehuizing. Voor het dempen van trillingen wordt vaak gebruik gemaakt van trillingdempers, die de overdracht van de trillingen naar de vloer sterk verminderen.

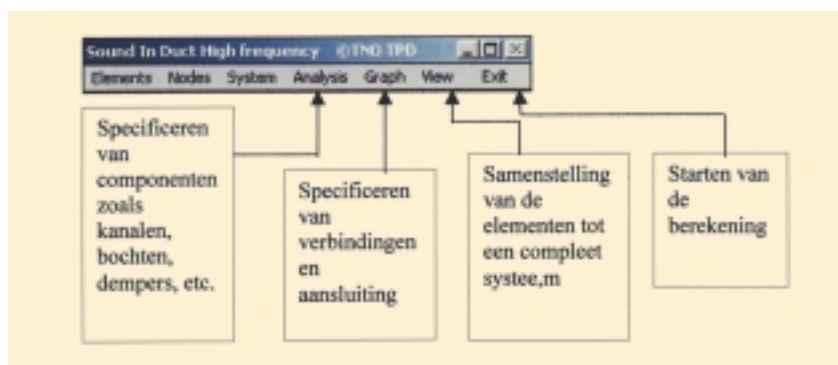
Het luchtgeluid dat in het kanaal komt, wordt over grotere afstand getransporteerd (geluidvoortplanting) door het kanaalsysteem. Door geluiddempers in het kanaal op te nemen kan de berekende reductie van de geluidvoortplanting worden gerealiseerd. Geluiddempers in het kanaal introduceren echter aanzienlijke luchtweerstand (drukval) die het transport van de lucht beïnvloeden. Om een zelfde hoeveelheid lucht te kunnen verplaatsen door een kanaal met een hogere weerstand is een sterkere ventilator nodig, die meer geluid zal produceren. Het aantal geluiddempers in een ventilatiesysteem moet echter niet alleen vanwege de kosten beperkt worden gehouden, maar ook om het lucht transport niet te zeer te beïnvloeden.

Naast de ventilator als geluidsbron, wordt ook geluid geproduceerd in het kanaal op plaatsen waar de snelheid van de lucht sterk toeneemt, bijvoorbeeld in scherpe bochten, nauwe kanalen, regelkleppen en uitblaas/afzuigrooster. Aangezien de ruimte die beschikbaar is voor ventilatiesystemen steeds kleiner wordt, is het gevolg dat het systeem compacter moet worden, waardoor de luchtsnelheden toenemen



Kanaalsysteem met een geluidsbron (bijvoorbeeld een ventilator), overdrachtselementen (kanaalsysteem) en ontvangruimte (a en b)

-FIGUUR 1-



Opbouw van het rekenprogramma waarin de verschillende elementen kunnen worden gespecificeerd, het systeem kan worden samengebouwd en de akoestische berekening kan worden uitgevoerd.

-FIGUUR 2-

om de gelijke hoeveelheid lucht te kunnen transporteren. Als gevolg daarvan neemt het aantal geluidsbronnen in het ventilatiesysteem toe.

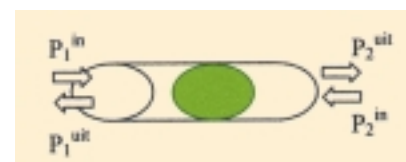
REKENPROGRAMMA VOOR LUCHTGELUID VAN COMPLEXE VENTILATIESYSTEMEN

In een rekenprogramma dat wordt gebruikt voor de berekening van de geluidoverdracht (luchtgeluid) van complexe kanalsystemen, worden de verschillende onderdelen daarvan, zoals ventilatoren, willekeurige bronnen, kanaaldelen, bochten, vertakkingen, uitblaasopeningen, afzuigopeningen, vernauwingen, enz., als subsysteem gemodelleerd [3, 4, 5].

Vervolgens wordt van alle onderdelen een netwerk samengebouwd, zoals in werkelijkheid het ventilatiesysteem wordt uitgelegd. Volledig automatisch kan nu een berekening worden opgestart voor de geluidoverdracht tussen alle punten in dit systeem en daaruit afgeleid de geluidsniveaus op willekeurige punten. Het stromingsgeïnduceerde geluid in bochten, enz. wordt automatisch berekend op basis van het debiet [5].

Het akoestische gedrag van de leidingen (geluidvoortplanting) is gemodelleerd volgens een vermogensbalans van de akoestische energie P die in het systeem wordt gebracht door de aanwezigheid van geluidsbronnen en wordt gedempt door absorptie-elementen. Voor een recht kanaal kan dit worden beschouwd aan de hand van de volgende uitdrukking voor de vermogensbalans van de energiecomponenten P_1 en P_2 .

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}_{\text{uit}} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}_{\text{in}} + \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix}$$



Modellering van een recht kanaaldeel op basis van een akoestische vermogensbalans.

-FIGUUR 3-

De matrix S modelleert de demping en reflectie van het kanaal. Indien het een kort kanaal betreft zonder dempingmateriaal zijn de componenten van de matrix $S_{11} = 0$, $S_{12} = 1$, $S_{21} = 1$ en $S_{22} = 0$. In het geval van demping

materiaal zullen de elementen S_{12} en S_{21} een waarde hebben tussen de nul en de één. Indien er reflectie in het kanaaldeel aanwezig (figuur 4) is, bijvoorbeeld door een obstructie, dan zullen de elementen S_{11} en S_{22} een waarde hebben tussen de nul en de één. Het geluidsvermogen van een bron in het kanaal (aangeduid met het groene vlak in figuur 3), bijvoorbeeld een ingebouwde axiaalventilator of geluid geproduceerd door de luchtstroming, wordt door de term Q in de uitdrukking gemodelleerd. Voor relatief nauwe kanalen, zonder toegevoegde demping, kan de demping per meter tussen de 0,1 en 0,5 dB bedragen. Indien het kanaal is voorzien van absorptiemateriaal is de demping aanzienlijk hoger.

Voor andere systeemelementen, zoals bochten, dempers, enz. wordt eenzelfde aanpak gebruikt, waarbij alleen de matrix S en het bronvermogen Q anders zullen zijn.

STROMINGSGEÏNDUCEERD GELUID IN BOCHTEN

Zoals hierboven al vermeld, kan de luchtstroming door bochten een significante hoeveelheid akoestisch vermogen produceren door de turbulentie die ontstaat bij de loslating van de stroming bij scherpe randen. In de stroming door een scherpe bocht treedt een vernauwing op, zodat de lokale stroomsnelheid sterk toeneemt met als gevolg een sterke toename van de turbulentie. Hoe scherper de bocht en hoe hoger de stromingssnelheid des te groter het geluidsvermogen dat door de stroming wordt geproduceerd.

Deze geluidsbron kan worden gezien als een fluctuerende stromingsweerstandskracht [6]. Deze fluctuerende kracht $F(St)$, veroorzaakt door de grote fluctuerende turbulentiestructuren in de bocht, is direct afhankelijk van de tijdsgemiddelde stromingsweerstand van de bocht (C_D), het getal van Mach M_0 (= stromingssnelheid / geluids-

snelheid), de doorsnede van de bocht (A) en de dichtheid (ρ_0) en geluidssnelheid (c_0).

Het akoestische vermogen $W(f)$ dat wordt gegenereerd kan worden uitgedrukt als:

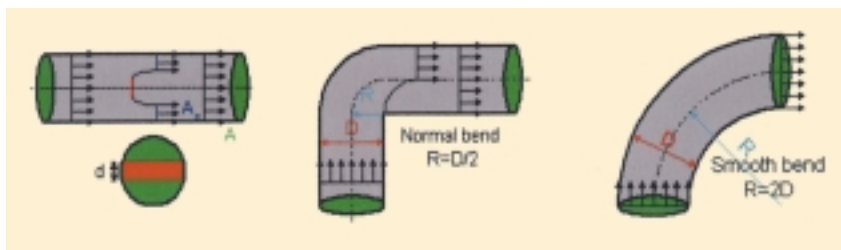
$$W(f) = F(S_1) A \rho_0 c_0^3 M_0^4 C_D^2 \quad (2)$$

De fluctuerende kracht $F(S_1)$ is een functie van het Strouhal-getal ($S_1 = f D/U$, f de frequentie, D de diameter en U de gemiddelde stromingssnelheid). $F(St)$ is bepaald uit metingen van het absolute akoestische vermogen $W(f)$ aan bochten met een specifieke geometrie [7]. Met behulp van vergelijking (2), zijn de spectra $F(St)$ onafhankelijk van de doorsneden van de bocht, de stromingssnelheid en andere parameters van de lucht. Voor een specifieke bocht vallen al deze spectra $F(St)$, gemeten bij verschillende stromingssnelheden, op elkaar (figuur 6). In het rekenprogramma wordt het geluidsvermogen van een bocht met willekeurige diameter en willekeurige stromingssnelheid empirisch berekend met behulp van de gemeten $F(S_1)$ en vergelijking (1).

GELUIDSVERMOGEN GEPRODUCEERD DOOR EEN VENTILATOR

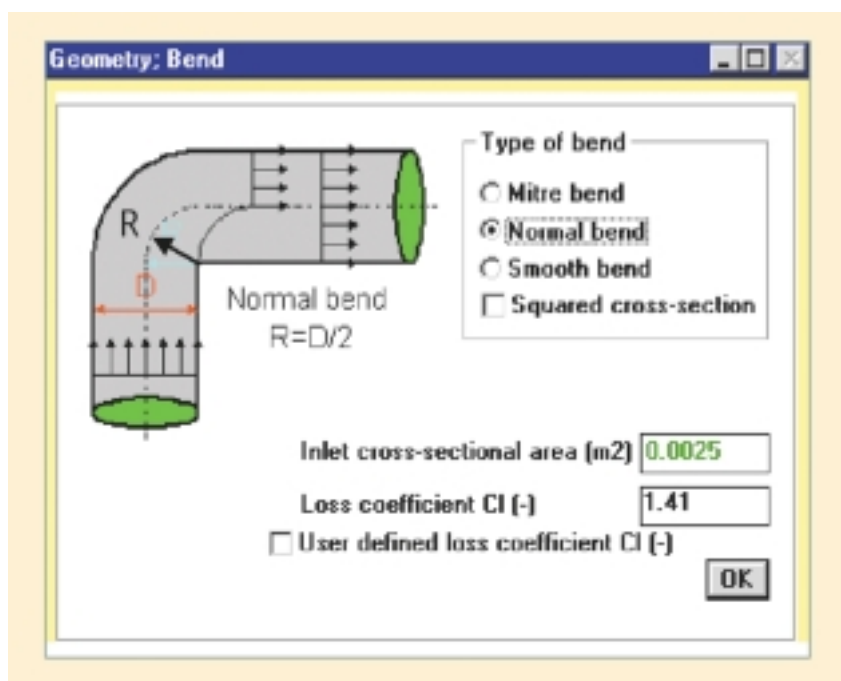
Op punten in het systeem waar zich een ventilator of andere akoestische bronnen bevinden, wordt het akoestische vermogen Q van de ventilator gespecificeerd. De akoestische gegevens kunnen door de gebruiker worden ingevoerd aan de hand van meegeleverde het geluidsvermoggenniveau van de ventilator. Deze is sterk afhankelijk van de bedrijfscondities (volume debiet en opvoerhoogte). Ventilatorleveranciers presenteren informatie over de geluidproductie meestal op het productblad dat wordt meegeleverd. Indien dat niet het geval is, kan gebruik worden gemaakt van normen zoals VDI 2081 [1] en VDI 3731 [9] om een schatting te maken van de geluidproductie van een ventilator.

VDI 2081 is een zogenaamde engineering standaard, die een schatting geeft van het geluidsvermoggenniveau L_w als functie van het volume debiet V en de opvoerhoogte ΔP . Afhankelijk van het type ventilator, radiaal of axiaal, vindt een correctie plaats, zoals aangegeven in figuur 2.



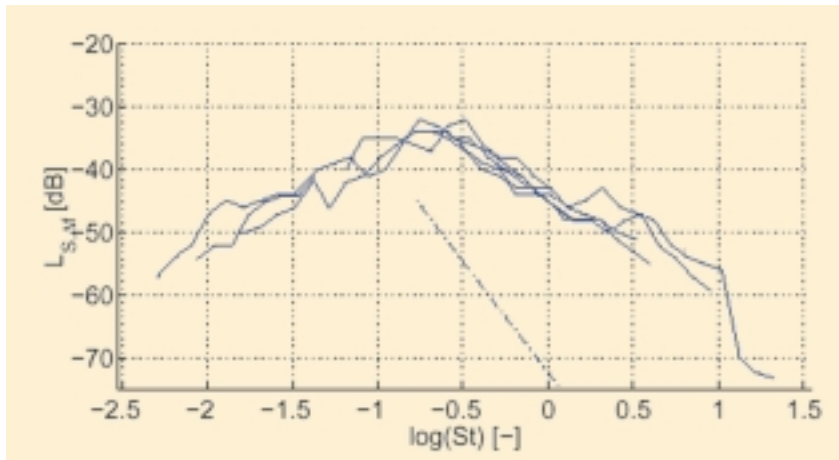
Voorbeeld van een aantal systeemelementen, links een leiding met een spoiler, in het midden een scherpe bocht en rechts, een bocht met grote kromming.

-FIGUUR 4-



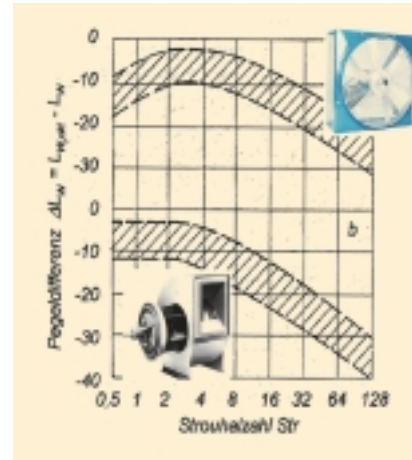
Schematisch overzicht van de stroming door een bocht.

-FIGUUR 5-



Spectra van de fluctuerende kracht $F(St)$ bij getallen van Mach variërend van 0.1 tot 0.34 als functie van het getal van Strouhal (St) voor een haakse bocht met scherpe randen [7].

-FIGUUR 6-



Geluidsvermogen van twee verschillende ventilatortypes als functie van de dimensieloze frequentie.

-FIGUUR 7-

$$L_w = 37 + 10 \log V + 20 \log \Delta P$$

$$L_{w_{\text{oct}}} = L_w + \Delta L_w$$

$$Q_{\text{oct}} = Q_{\text{ref}} 10^{L_{w_{\text{oct}}/10}$$

$$Sr = f D / U \text{ (Strouhal getal)}$$

$$\Delta P = \text{opvoerhoogte van de ventilator [Pa]}$$

$$f = \text{octaaftand frequentie [Hz]}$$

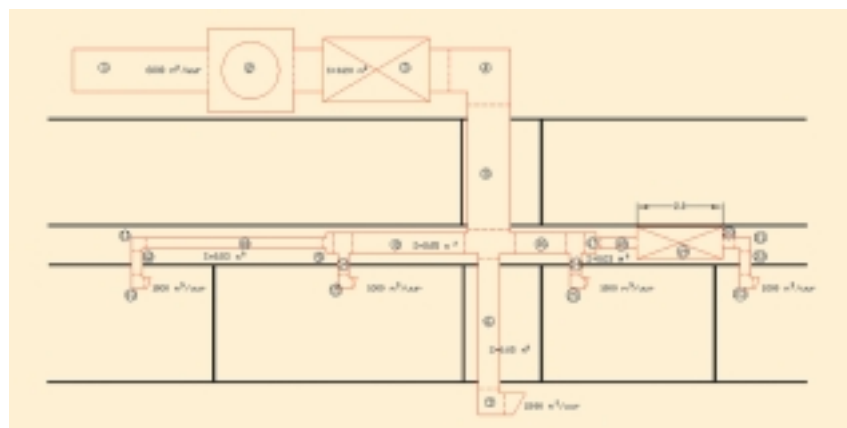
$$D = \text{rotor diameter [m]}$$

$$U = \text{rotor omtreksnelheid [m/s]}$$

$$V = \text{volume debiet [m}^3/\text{s]}$$

$$Q_{\text{oct}} = \text{geluidsvermogen van de ventilator}$$

$$Q_{\text{ref}} = \text{referentie vermogen} = 10\text{-}12 \text{ Watt}$$



Rekenvoorbeeld van een ventilatiesysteem.

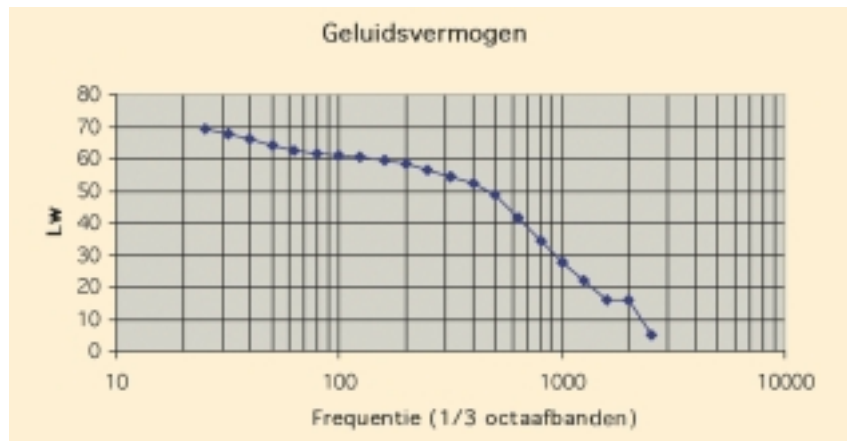
-FIGUUR 8-

Voorbeeld van een ventilatiesysteem

Het volgende voorbeeld is een ventilatiesysteem bestaande uit één radiaal ventilator (tabel 1), het kanaalsysteem bestaande uit twee dempers en pijpelementen met verschillende doorsnede en enkele afzuigopeningen. De elementen van dit systeem zijn allen in het model ingevoerd en is er een samenhangend model van gemaakt aan de hand van figuur 8.

Dit model wordt gebruikt om de akoestische berekening te gaan uitvoeren. Stromingsgeïnduceerd geluid treedt op in de bochten en in het bijzonder in de bochten waar de stromingssnelheid hoog is ($> 10 \text{ m/s}$). In dit systeem zal stromingsgeïnduceerd geluid in de bochten 4, 7, 11, 13, 15, 21, 23 en 25 een grote rol spelen. Het geluidsvermogen gegenereerd door de turbulente stroming in de bochten wordt berekend volgens de procedure hierboven beschreven.

Het geluid dat door de ventilator wordt geproduceerd is bepaald op basis van



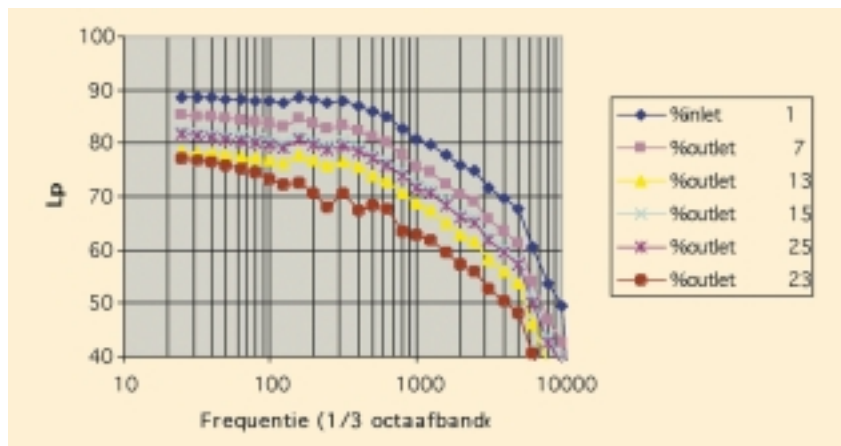
Geluidsvermogen [dB] re. 1 pW geproduceerd door de turbulente stroming door bocht no. 23 bij een gemiddelde snelheid van $9,25 \text{ m/s}$.

-FIGUUR 9-

V	$= 6000 \text{ m}^3 / \text{uur} = 2.1 \text{ m}^3 / \text{sec}$						
D	$= 0.5 \text{ m}$ (rotor diameter)						
R_{pm}	$= 2500$ (toerental)						
U	$= \frac{D \cdot 2500}{60} = 65 \text{ m/s}$ (tipsnelheid)						
ΔP	$= 250 \text{ Pa}$ (opvoerhoogte)						
L_w	$= 78 \text{ dB re } 10^{-5} \text{ Pa}$ (ongecorrigeerd geluidsvermogen)						
f	63.5	125	250	500	1k	2k	4k
$L_{w_{\text{oct}}}$	76	76	76	75	70	67	60

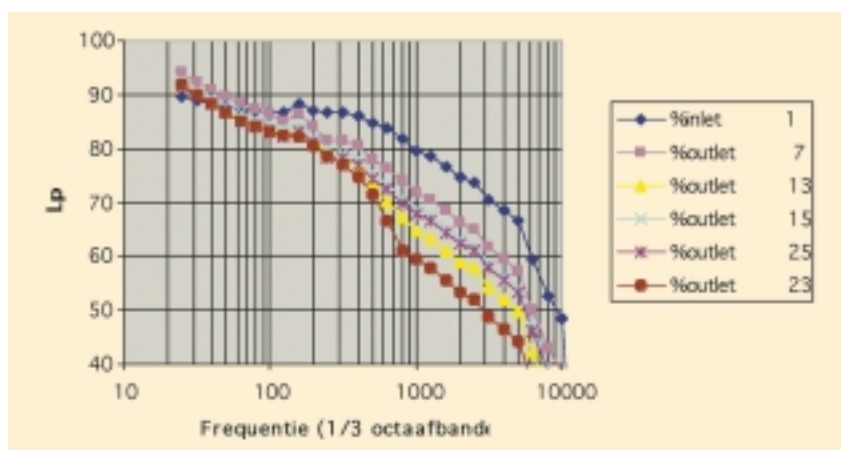
Geluidsvermogen van de ventilator gebaseerd op de VDI 2081 standaard

-TABEL 1-



Geluidrukniveaus [dB] re. 10^{-5} Pa bij de afblaasmond van de ventilator en de verschillende afzuigopeningen in het gebouw waarbij de luchtstroming door het systeem gelijk nul is (dus geen stromingsgeïnduceerd geluid).

-FIGUUR 10-



Geluidrukniveaus [dB] re. 10^{-5} Pa bij de afblaasmond van de ventilator en de verschillende afzuigopeningen in het gebouw waarbij de luchtstroming door het systeem ongelijk nul is (dus wel stromingsgeïnduceerd geluid).

-FIGUUR 11-

VDI 2081 (tabel 1), omdat er nog geen gegevens bekend waren van een leverancier. Dit is dus in principe een eerste inschatting.

In het systeem zijn twee demper geplaatst. Eén (3) direct achter de ventilator en één (19) kort voor de meest rechtse afzuigopening. De demping is berekend is op basis van in de literatuur beschreven rekenmethoden [10]. Voor de demper is aangenomen dat de maximale luchtgeluidsdemping gelijk is aan 40 dB. Deze bovengrens wordt veroorzaakt door de overdracht van geluid via de constructie van de demper.

De resultaten van de akoestische berekening bestaan uit de geluidsdrukken op verschillende posities in het systeem ten gevolge van de geluidsbronnen (ventilator en stromingsgeïnduceerd geluid in de bochten) en de overdracht via het kanaalsysteem.

Uit de figuren 10 en 11 valt direct op dat de bijdrage van het stromingsgeïnduceerde geluid door de bochten significant bijdraagt aan de resulterende geluidsniveaus bij de afzuigopeningen. Voor lage frequenties is dus ook direct te zien dat de dempers weinig effect hebben, omdat het geluidsniveau na de dempers wordt bepaald door het stromingsgeluid en niet door het gedempte ventilatorgeluid.

CONCLUSIES

Uit bovenstaand voorbeeld, dat nog relatief eenvoudig is, blijkt dat stromingsgeïnduceerd geluid in ventilatiesystemen een zeer belangrijke rol kan spelen. In standaard rekenmethoden worden deze bronnen van geluid echter vaak verwaarloosd.

De ontwikkeling van rekenmodellen voor stromingsgeïnduceerd geluid kunnen een welkome zelfs noodzakelijke aanvulling zijn op de bestaande

modellen voor de overdracht via een kanaalsysteem van het geluid geproduceerd door ventilatoren en andere geluidsbronnen.

Voor complexere ventilatiesystemen, waar een aanzienlijke hoeveelheid geluidsbronnen en kanaalsysteem aanwezig zijn, kan efficiënt gebruik worden gemaakt van geautomatiseerde berekeningen. Wijzigingen in het ontwerp kunnen snel worden geverifieerd, omdat het model niet steeds opnieuw hoeft te worden opgebouwd.

Deze rekenprogramma's stellen de ontwerper in staat om een goed beeld te krijgen van de geluidsproblematiek. Dit schept de mogelijkheid om in een vroeg stadium adequate en kosteneffectieve maatregelen te nemen, zodat bij de uiteindelijke realisatie zo goed mogelijk aan de vereiste geluidsniveaus kan worden voldaan.

REFERENTIES

1. VDI 2081, *Sound production and reduction in ventilation systems* (in German: *Geräuscherzeugung und Lärminderung in Raumlufttechnischen Anlagen*), VDI, 2000.
2. ISSO publicatie 24 *Ontwerpaanbevelingen en grondslagen voor geluidberekeningen in gebouwen met luchttechnische installaties*
3. Hans Bodén, Mats Åbom en Stefan Nygård 2001, ICSV 8 paper no. 164 SID, *computer code for prediction of sound from complex duct systems*
4. Hans Gijrath en Mats Åbom Proceedings of ASME 5th International Symposium FSI, AE & FIV+N New Orleans from November 17-22, 2002 paper NCA 33356 *A Matrix formalism for fluid borne sound in pipe systems*
5. Hans Gijrath, Stefan Nygård en Mats Åbom 2001 ICSV 8 paper no. 578 *Modelling of flow generated sound in ducts*
6. P.A. Nelson en C.L. Morfey 1981 Journal of Sound and Vibration 79(2), 263-289. *Aerodynamic sound production in low speed flow ducts*
7. J.W.M. Gijrath, B.T. Verhaar & J.C. Bruggeman, Proceedings of the Flow Induced Vibration conference in Luzern 1999 *Prediction model for broadband noise in bends*
9. VDI 3731 Blatt 2 *Emissionskennwerte technischer Schallquellen; Ventilatoren*
10. Munjal *Acoustics of Ducts and Mufflers* ISBN 0-471-84738-0