



NLR-TP-2004-164

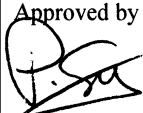

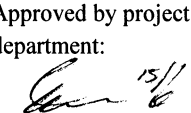
Lokaliseren van bewegende aëro-akoestische geluidsbronnen met microfoon arrays

P. Sijtsma

Dit rapport is gebaseerd op een presentatie gehouden bij NAG bijeenkomst "Stromingsgeluid", te Utrecht op 29 mei 2002, en is tevens gepubliceerd in het NAG Journaal, nr. 161, mei 2002.

Uit dit rapport mag worden geciteerd onder de voorwaarde dat volledige bronvermelding plaatsvindt.

Opdrachtgever: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium
Werkplannummer: AV.1.C.1
Eigenaar: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium
Hoofdafdeling: Aerospace Vehicles
Verspreiding: Onbeperkt
Rubricering titel: Ongerubriceerd
april 2004

Approved by author:  14/5/04	Approved by project manager:  4/6/04	Approved by project managing department:  15/6
--	---	--



Samenvatting

A method is described for the location of moving sources by a microphone array. This method can be applied to out-of-flow measurements in an open jet wind tunnel. For that purpose, an expression is given for the pressure field of a moving monopole in a uniform flow. It is argued that the effects of sound refraction through the open jet shear layer can easily be corrected. Further, a technique is described to minimise the effects of low signal/noise ratio. The new method, which allows in principle for any subsonic motion, was implemented for rotating sources and for sources in steady, rectilinear motion. The method was tested with a set-up of rotating whistles. This test demonstrated convincingly the capability to reconstruct the emitted sound. Effects of Doppler frequency shift were correctly adjusted by the new method. Further applications to rotating sources are presented for measurements on blades of a helicopter in hover and on wind turbine blades. An application of the method to sources in steady motion is shown for array measurements on landing airplanes. For each of these applications, the noise sources could be made well visible.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Methode	5
2.1	Bronbeschrijving	5
2.2	Correctie voor de schuiflaag	5
2.3	Reconstructie van het bronsignaal	6
2.4	Reconstructie van bronspectra	7
2.5	Minimalisering van het effect van windruis	7
3	Toepassingen	8
3.1	Roterende fluitjes	8
3.2	Helikopter model	11
3.3	Windturbinemodel	12
3.4	Metingen op Schiphol	13
4	Conclusies	13
	Literatuur	14

12 Figuren

(14 pagina's totaal)



1 Inleiding

In de afgelopen tien jaar hebben akoestische arrays zich ontwikkeld tot een standaard hulpmiddel bij akoestische metingen in windtunnels. Voorheen werden vaak elliptische spiegels ingezet om geluidsbronnen te detecteren, maar de voortschrijdende techniek op het gebied van computers en apparatuur voor data-acquisitie maakt de toepassing van arrays steeds interessanter. Tegenwoordig is het mogelijk om te meten met een groot aantal kanalen, met een hoge bemonsteringsfrequentie en met een lange meettijd [1]. Daarmee verdwijnen de traditionele voordelen van elliptische spiegels. Het grote voordeel van arrays blijft bestaan, nl dat het focuseren op potentiële geluidsbronnen gedaan kan worden na afloop van de metingen, gebruik makend van de verwerkingsprogrammatuur, terwijl een spiegel voor iedere afzonderlijke focus moet worden ingesteld tijdens de metingen. Metingen met arrays vergen dus veel minder (windtunnel)tijd.

Een ander voordeel van arrays is de mogelijkheid om te focuseren op geluidsbronnen op bewegende objecten. Deze mogelijkheid is onder meer toegepast op langrijdende treinen [2,3] en op overvliegende vliegtuigen [4,5]. Er is echter geen noodzaak voor een beperking tot eenparige bewegingen zoals bij bovengenoemde voorbeelden. Dit artikel zal laten zien dat bronlokalisering met akoestische arrays in principe mogelijk is bij een willekeurige beweging. Het is zelfs mogelijk om de focuseren op bewegende bronnen in een windtunnel, waarbij het array buiten de stroming staat.

Om te komen tot een dergelijke verwerkingsmethode voor array-metingen, moeten we in de eerste plaats de beschikking hebben over een goede beschrijving van het geluidsveld van een bewegende bron in een uniforme stroming. Vervolgens is een correctie van deze bronbeschrijving nodig voor het effect van de schuiflaag van de windtunnel: het overgangsgebied van uniforme tunnelstroming naar windstilte buiten de tunnelstraal. Tenslotte is het bij windtunnelmetingen gewenst om te beschikken over een verwerkingsmethode die het effect van lage signaal-ruisverhoudingen minimaliseert. Deze drie zaken komen successievelijk aan de orde in dit artikel.

Na de beschrijving van de methode zal een drietal toepassingen worden getoond waarbij de bronnen roteren: een opstelling met roterende fluitjes en windtunnelmetingen aan een helikoptermodel en aan een windturbinemodel. Tenslotte zal een resultaat worden getoond van metingen aan overvliegende vliegtuigen nabij Schiphol.

2 Methode

2.1 Bronbeschrijving

In de nu volgende analyse gaan we uit van een cartesisch assenstelsel (x, y, z) . De fysische parameters zijn dimensieloos gemaakt. De hoofdstroming \vec{M} is uniform. We gaan uit van een bewegende akoestische monopool. Het akoestische drukveld p dat daar bij hoort wordt beschreven door de differentiaalvergelijking

$$\nabla^2 p - \frac{D^2 p}{Dt^2} = \sigma(t) \delta(\vec{x} - \vec{\xi}(t)), \quad (1)$$

waarbij δ de delta functie van Dirac is, $\sigma(t)$ het bronsignaal en $\vec{\xi}(t)$ de tijdsafhankelijke positie van de bron. De “convectieve afgeleide” D/Dt is gedefinieerd als:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{M} \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial t} + M_x \frac{\partial}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y} + M_z \frac{\partial}{\partial z}. \quad (2)$$

De algemene oplossingsmethode voor vergelijking (1) is beschreven door Howe [6]. Een meer specifieke oplossingsmethodiek is beschreven door Sijtsma et al [7]. De oplossing is:

$$p(\vec{x}, t) = \frac{\sigma(\tau_e)}{4\pi \left\{ t - \tau_e + \left(-\vec{\xi}'(\tau_e) + \vec{M} \right) \cdot \left(\vec{x} - \vec{\xi}(\tau_e) - \vec{M}(t - \tau_e) \right) \right\}}, \quad (3)$$

waarbij τ_e de emissietijd is, die als volgt in relatie staat met de immissietijd t :

$$t - \tau_e = \left\| \vec{x} - \vec{\xi}(\tau_e) - \vec{M}(t - \tau_e) \right\|. \quad (4)$$

We hebben hiermee een niet-expliciete uitdrukking voor $p(\vec{x}, t)$ afgeleid. Immers uit (4) kunnen we in het algemeen geen expliciete uitdrukking afleiden voor τ_e als functie van t .

Omgekeerd kunnen we uit (4) wel een expliciete uitdrukking afleiden voor t als functie van τ_e . Het resultaat is:

$$t = \tau_e + \frac{1}{1 - M^2} \left\{ -\left(\vec{x} - \vec{\xi}(\tau_e) \right) \cdot \vec{M} + \sqrt{\left[\left(\vec{x} - \vec{\xi}(\tau_e) \right) \cdot \vec{M} \right]^2 + \left(1 - M^2 \right) \left\| \vec{x} - \vec{\xi}(\tau_e) \right\|^2} \right\}, \quad (5)$$

waarin $M = \left\| \vec{M} \right\|$ het getal van Mach is.

2.2 Correctie voor de schuiflaag

De bronbeschrijving in de vorige paragraaf is alleen geldig voor uniforme stromingen. Met andere woorden, de ontvanger (\vec{x}) moet zich in dezelfde stroming bevinden als de bron ($\vec{\xi}(t)$). Voor metingen buiten de stroming, bijvoorbeeld bij open windtunnels, moet er gecorrigeerd worden voor het effect van geluidstransmissie door de schuiflaag. Een eenvoudige doch effectieve correctie wordt verkregen door in (3) de snelheidsvector \vec{M} te

vervangen door een gemiddelde stromingsnelheid tussen bron en ontvanger. De gecorrigeerde snelheidsvector kan dan verkregen worden door:

$$\vec{M}_{\text{cor}} = \vec{M} \frac{\|\vec{\xi}_0(\tau_e) - \vec{\xi}(\tau_e)\|}{\|\vec{x} - \vec{\xi}(\tau_e)\|}, \quad (6)$$

waarbij $\vec{\xi}_0(\tau_e)$ het snijpunt is van de lijn door \vec{x} en $\vec{\xi}(\tau_e)$ en het midden van de schuiflaag. Deze ietwat grofstoffelijke correctie is uitgebreid vergeleken met twee geavanceerdere methoden, te weten de ‘‘Amiet’’ correctie voor een oneindig dunne schuiflaag [8] en een correctie op basis van stralen-akoestiek [9], waarbij de eindige dikte van de schuiflaag in rekening wordt gebracht. Deze vergelijkingen bestonden uit array-simulaties met een stilstaande monopool. Het bleek dat de verschillen te verwaarlozen waren, zo lang het getal van Mach niet te groot is (zeg $M < 0.25$) en de hoeken tussen akoestische stralen en de schuiflaag niet te klein (zeg $> 45^\circ$).

2.3 Reconstructie van het bronsignaal

Stel dat $\chi_n(t)$, $n = 1, \dots, N$ tijdsignalen zijn, opgenomen door N microfoons in \vec{x}_n .

Focuseren op een bewegend punt $\vec{\xi}(t)$ betekent aannemen dat het geluidsveld ter plaatse van de microfoons beschreven wordt door vergelijking (3), plus een restterm $\varepsilon_n(t)$ voor de ruis en/of bijdragen van andere bronnen:

$$\chi_n(t_n) = \frac{\sigma(\tau_e)}{4\pi \left\{ t_n - \tau_e + \left(-\vec{\xi}'(\tau_e) + \vec{M} \right) \cdot \left(\vec{x}_n - \vec{\xi}(\tau_e) - \vec{M}(t_n - \tau_e) \right) \right\}} + \varepsilon_n(t_n). \quad (7)$$

We introduceren de overdrachtsfunctie T_n door vergelijking (7) kortweg te schrijven als:

$$\chi_n(t_n) = \frac{\sigma(\tau_e)}{T_n(t_n, \tau_e)} + \varepsilon_n(t_n). \quad (8)$$

Bij vaste emissietijd τ_e is de immisietijd t_n microfoon-afhankelijk:

$$t_n = \tau_e + \frac{1}{1-M^2} \left\{ -\left(\vec{x}_n - \vec{\xi}(\tau_e) \right) \cdot \vec{M} \pm \sqrt{\left[\left(\vec{x}_n - \vec{\xi}(\tau_e) \right) \cdot \vec{M} \right]^2 + (1-M^2) \left\| \vec{x}_n - \vec{\xi}(\tau_e) \right\|^2} \right\} \quad (9)$$

Door vergelijking (8) te vermenigvuldigen met T_n kan een gereconstrueerd bronsignaal $\bar{\sigma}_n(\tau_e)$ worden berekend:

$$\bar{\sigma}_n(\tau_e) \stackrel{\text{def}}{=} \chi_n(t_n) T_n(t_n, \tau_e) = \sigma(\tau_e) + \varepsilon_n(t_n) T_n(t_n, \tau_e). \quad (10)$$

Dit kunnen we middelen over alle microfoons:

$$\bar{\sigma}(\tau_e) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\sigma}_n(\tau_e) = \sigma(\tau_e) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon_n(t_n) T_n(t_n, \tau_e) . \quad (11)$$

Hoe groter het aantal microfoons N is, hoe kleiner het verschil tussen gereconstrueerd bronsignaal $\bar{\sigma}(\tau_e)$ en werkelijk bronsignaal $\sigma(\tau_e)$.

2.4 Reconstructie van bronspectra

Het frequentie-spectrum van een bronsignaal kan worden gereconstrueerd door vergelijking (11) te evalueren voor $\tau_e = j \times \Delta t$, $j = 1, \dots, B$ en door vervolgens een discrete Fourier transformatie (DFT) toe te passen:

$$\tilde{\mathfrak{S}}(\bar{\sigma}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\mathfrak{S}}(\bar{\sigma}_n) . \quad (12)$$

De DFT $\tilde{\mathfrak{S}}$ is hier in vector notatie geschreven. De afzonderlijke componenten \mathfrak{S}_j zijn de resultaten voor de frequenties:

$$f_j = j / \Delta t \quad (13)$$

Het power-spectrum wordt als volgt berekend:

$$\frac{1}{2} |\mathfrak{S}_j(\bar{\sigma})|^2 = \frac{1}{2N^2} \left| \sum_{n=1}^N \mathfrak{S}_j(\bar{\sigma}_n) \right|^2 = \frac{1}{2N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \mathfrak{S}_j(\bar{\sigma}_n) \mathfrak{S}_j(\bar{\sigma}_m)^* , \quad (14)$$

waarbij het sterretje staat voor de complex geconjugeerde. Uit (11) volgt:

$$\frac{1}{2} |\mathfrak{S}_j(\bar{\sigma})|^2 = \frac{1}{2} \left| \mathfrak{S}_j(\sigma) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathfrak{S}_j(\varepsilon_n / T_n) \right|^2 . \quad (15)$$

2.5 Minimalisering van het effect van windruis

Stel nu dat in (15) $\varepsilon_n(t)$ is stochastisch en incoherent tussen de verschillende microfoons (bijv. windruis). Na middeling over een voldoende aantal tijdblokken, blijft van (15) de volgende uitdrukking over:

$$\frac{1}{2} |\mathfrak{S}_j(\bar{\sigma})|^2 = \frac{1}{2} |\mathfrak{S}_j(\sigma)|^2 + \frac{1}{2N^2} \sum_{n=1}^N |\mathfrak{S}_j(\varepsilon_n / T_n)|^2 . \quad (16)$$

In plaats van (14), is ook de volgende schatting mogelijk voor het power-spectrum.

$$\frac{1}{2} |\mathfrak{S}_j(\bar{\sigma})|^2 = \frac{1}{2N(N-1)} \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N \mathfrak{S}_j(\bar{\sigma}_n) \mathfrak{S}_j(\bar{\sigma}_m)^* = \frac{1}{2N(N-1)} \left(\left| \sum_{n=1}^N \mathfrak{S}_j(\bar{\sigma}_n) \right|^2 - \sum_{n=1}^N |\mathfrak{S}_j(\bar{\sigma}_n)|^2 \right) \quad (17)$$

Nog steeds onder de aanname dat $\varepsilon_n(t)$ stochastisch and incoherent is, en na middeling, vinden we simpelweg

$$\frac{1}{2} |\mathfrak{I}_j(\bar{\sigma})|^2 = \frac{1}{2} |\mathfrak{I}_j(\sigma)|^2, \quad (18)$$

met andere woorden: de verwachte fout is nu nul.

Deze alternatieve methode, die analoog is aan de bekende methode van het weglaten van array-autopowers, is zeer geschikt voor metingen met een hoog ruisniveau. Aan de andere kant is enige voorzichtigheid geboden, omdat de methode niet positief-definiet is. Dat wil zeggen: het rechterlid van (17) kan negatief worden, hetgeen fysisch onjuist is. Bij windtunnelmetingen is de signaal-ruisverhouding meestal echter zo laag dat er noodgedwongen met deze alternatieve methode gewerkt moet worden.

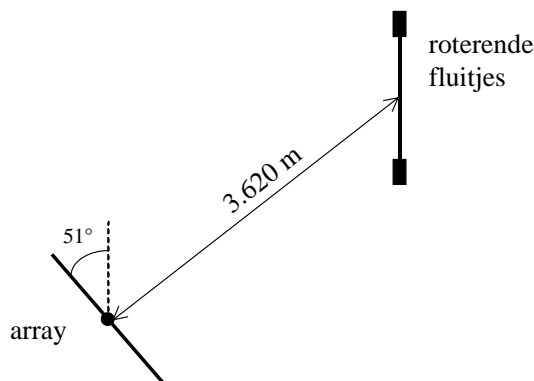
3 Toepassingen

3.1 Roterende fluitjes

Om de nieuwe array-verwerkingsmethode te testen werd een apparaat gemaakt met twee roterende fluitjes (figuur 1). Het ene fluitje produceerde een toon van 3150 Hz, het andere een toon van 5000 Hz. In de anechoïsche kamer van het NLR werden metingen hieraan uitgevoerd met een array van 35 microfoons. Het array werd schuin voor het rotatievlak geplaatst (figuur 2) zodat frequentieverschuiving (dopplereffect) ook een rol ging spelen.



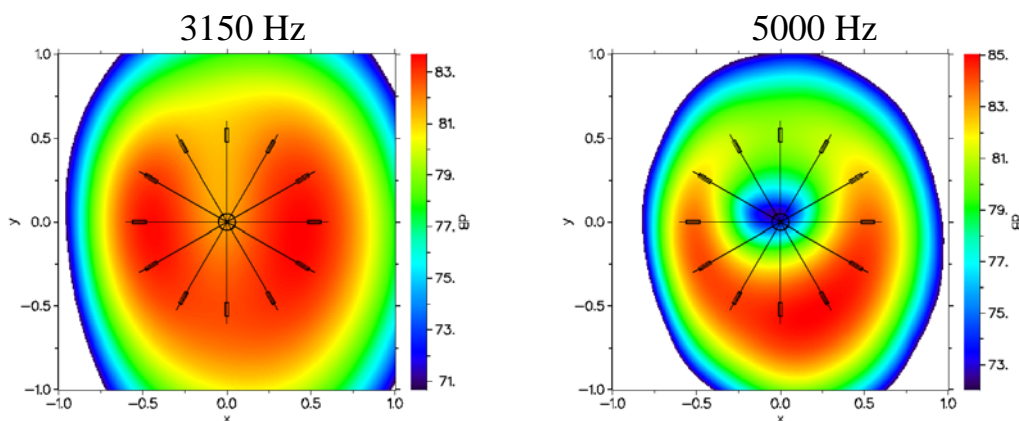
Figuur 1: Roterende fluitjes.



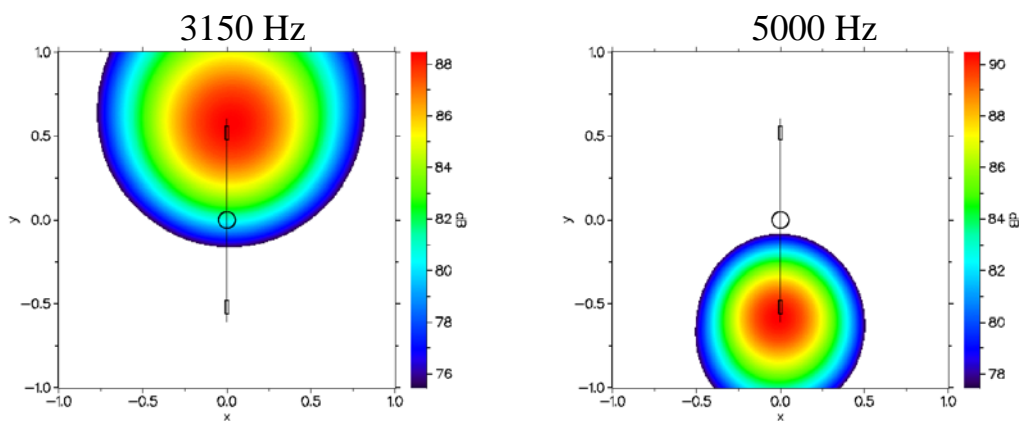


Figuur 2: Opstelling met roterende fluitjes en array.

Het verschil tussen een standaard array-verwerking en de nieuwe methode wordt duidelijk door figuur 3 en 4 met elkaar te vergelijken. In beide figuren staan akoestische bronplaatjes bij 3150 Hz en 5000 Hz (1/3 octaaf banden); figuur 3 is het resultaat van standaard verwerking, figuur 4 is geproduceerd met meedraaiende focus. In dit geval draaiden de fluitjes met 354 omwentelingen per minuut (rpm).

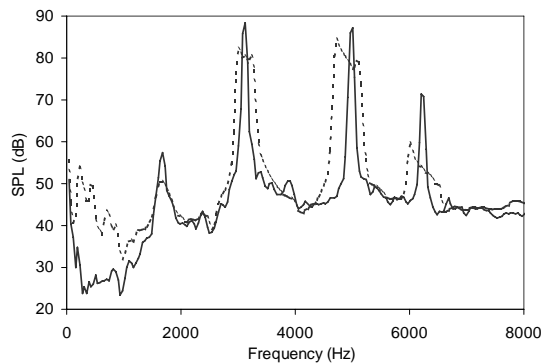


Figuur 3: Bronplaatjes van roterende fluitjes, bij standaard array-verwerking.



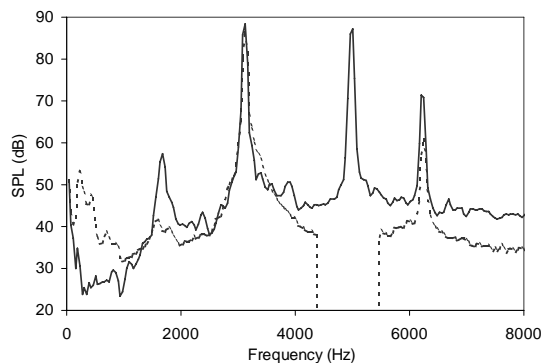
Figuur 4: Bronplaatjes van roterende fluitjes, bij nieuwe verwerkingsmethode.

Om te onderzoeken in hoeverre de nieuwe methode in staat is om bronspectra te reconstrueren, leggen we eerst de power-spectra van stilstaande en draaiende fluitjes naast elkaar, gemeten door de middelste microfoon in het array (figuur 5). Duidelijk waarneembaar is de verbreding van de pieken in de spectra bij roterende fluitjes, als gevolg van het dopplereffect.

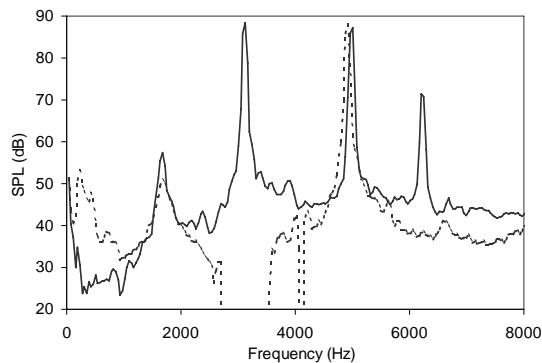


Figuur 5: Spectra van middelste array-microfoon: — stilstaande fluitjes; --- roterende fluitjes.

We rekenen nu, met de nieuwe methode, het bronspectrum uit, focuserend op het fluitje met 3150 Hz. Dit gereconstrueerde spectrum vergelijken we, na correctie voor de afstand, met het spectrum van de middelste microfoon bij stilstaande fluitjes. Het resultaat is te zien in figuur 6. De piekfrequentie wordt goed teruggevonden, zowel qua frequentie als qua niveau. Bij de boventoon (6300 Hz) zien we een kleine onderpredictie, vermoedelijk als gevolg van coherentieverlies. Voor het tweede fluitje is een zelfde vergelijking te zien in figuur 7. Weer wordt het piekniveau goed voorspeld, alleen is er sprake van een kleine frequentieverschuiving, die verklaard kan worden uit de richtingkarakteristiek van de fluittoon.



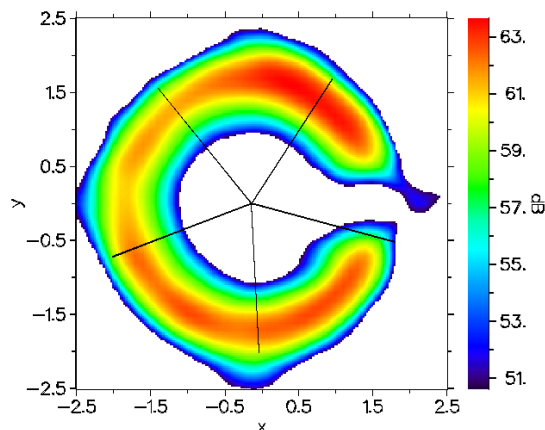
Figuur 6: Spectra van middelste array-microfoon: — stilstaande fluitjes; --- reconstructie bij roterende fluitjes, focuserend op fluitje 1.



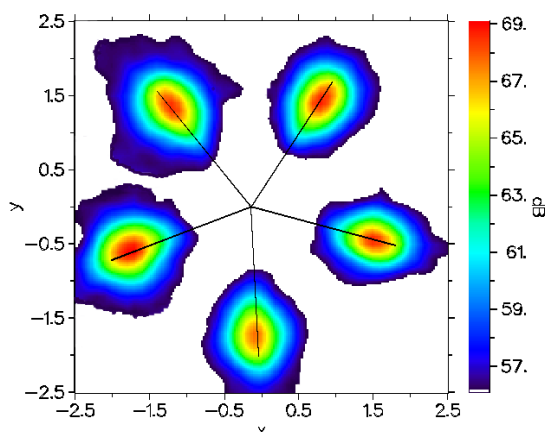
Figuur 7: Spectra van middelste array-microfoon: — stilstaande fluitjes; --- reconstructie bij roterende fluitjes, focuserend op fluitje 2

3.2 Helikopter model

In de open configuratie van de “Large Low-speed Facility” (LLF) van de DNW windtunnels, zijn array-metingen (136 microfoons) verricht aan een schaalmodel van een helikopter met 5 bladen. Een van de configuraties betrof de zogenaamde “hover” configuratie, waarbij een helikopter stil hangt. Het toerental was hier 852 rpm en er was geen wind. In figuur 8 is een akoestische bronplaatje (bij 2000 Hz) van deze configuratie te zien, verkregen met standaard array-verwerking. Een ringvormig brongebied is zichtbaar; het “gat” aan de rechterkant is de schaduw van de romp van het model. Figuur 9 toont hetzelfde plaatje, maar dan met meedraaiende focus. Duidelijk is nu te zien dat de geluidsbronnen zich bevinden op de bladen.



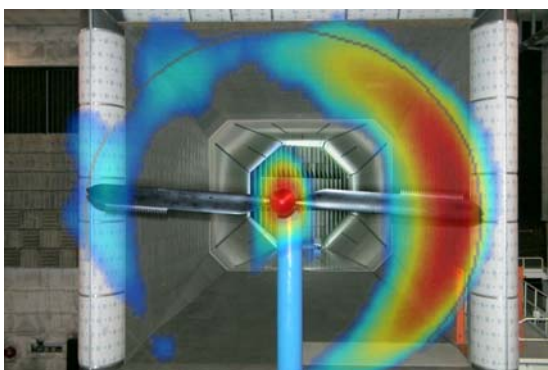
Figuur 8: Bronplaatje van helikoptermodel, bij standaard array-verwerking.



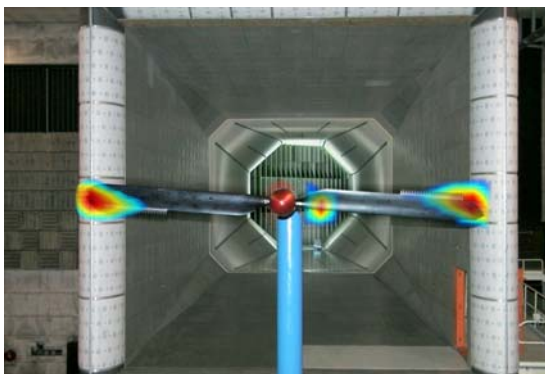
Figuur 9: Bronplaatje van helikoptermodel, bij nieuwe verwerkingsmethode

3.3 Windturbinemodel

Met hetzelfde array als bij de helikoptermetingen werden in de DNW-LLF metingen verricht aan een schaalmodel van een windturbine. Het doel van deze metingen was het vaststellen van het geluidsreducerende effect van zaagtandprofielen aan de achterrand van de bladen. De metingen werden verricht bij een toerental van 424 rpm en een windsnelheid van 14 m/s. In figuur 10 is een bronplaatje te zien (8000 Hz) bij standaardverwerking en in figuur 11 staat een bronplaatje verkregen met de nieuwe methode. Met de nieuwe verwerkingsmethode zijn de bronlocaties duidelijk zichtbaar geworden. In dit geval is ook duidelijk gemaakt dat toepassing van zaagtandprofielen inderdaad het grenslaag-achterrandgeluid sterk doet reduceren. Opmerkelijk is ook de geluidsbron op de voorrand van een van de bladen, dichtbij de naaf, waar een overgang is tussen twee verschillende bladprofielen. Details van deze metingen zijn beschreven door Oerlemans et al [10].



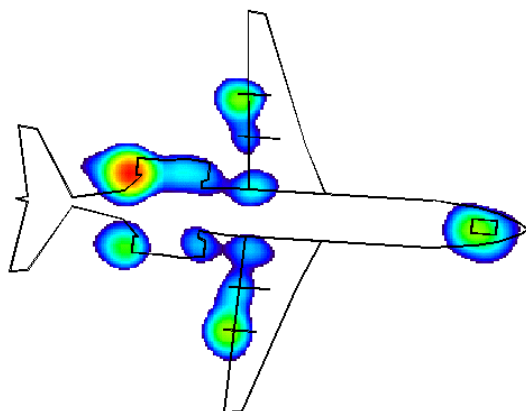
Figuur 10: Bronplaatje van windturbinemodel, bij standaard array-verwerking.



Figuur 11: Bronplaatje van windturbinemodel, bij nieuwe verwerkingsmethode.

3.4 Metingen op Schiphol

De nieuwe methode werd ook toegepast op metingen aan landende vliegtuigen nabij Schiphol. In dit geval was de beweging van de focus eenparig. Deze metingen werden gedaan met een horizontaal array van 122 microfoons, die geplaatst was in het verlengde van de Kaagbaan. De vliegtuigen vlogen op ongeveer 40 m hoogte over. De precieze hoogte en snelheid werden bepaald met behulp van optische sensoren. In figuur 12 staat, als voorbeeld, een bronplaatje (1250 Hz) van een Fokker 100. De bekende geluidsbronnen zijn goed zichtbaar: inlaat en uitlaat van de motoren, landingsgestellen en klep-zijranden.



Figuur 12: Bronplaatje van landende Fokker 100.

4 Conclusies

Een nieuwe verwerkingsmethode voor array-metingen is ontwikkeld om geluidsbronnen te lokaliseren op bewegende objecten. De methode laat in principe een willekeurige beweging toe en is onder meer toepasbaar op windtunnelmetingen. De methode is getest met een opstelling met roterende fluitjes en is vervolgens toegepast op windtunnelmetingen aan

schaalmodellen van een helikopter en een windturbine, en op metingen aan landende vliegtuigen nabij Schiphol. Alle toepassingen bleken succesvol.

Literatuur

1. Holthusen, H., en Smit, 2001, H., "A new data acquisition system for microphone array measurements in wind tunnels", AIAA paper 2001-2169.
2. Takano, Y., Horihata, K., Kaneko, R., Matsui, Y., en Fujita, H., 1996, "Analysis of sound source characteristics of Shinkansen cars by means of x-shaped microphone array", *Internoise 96*, Liverpool.
3. Barsikow, B., 1996, "Experiences with various configurations of microphone arrays used to locate sound sources on railway trains operated by the DB AG", *JSV* 193(1), pp. 283-293.
4. Michel, U., Barsikow, B., Helbig, J., Hellmig, M., en Schüttpelz, M., 1998, "Flyover noise measurements on landing aircraft with a microphone array", AIAA Paper 98-2336.
5. Piet, J.-F., en Elias, G., 1999, "Localization of acoustic source from a landing aircraft with a microphone array", AIAA Paper 99-1811.
6. Howe, M.S., 1998, *Acoustics of Fluid-Structure Interactions*, Cambridge University Press.
7. Sijtsma, P., Oerlemans, S., en Holthusen, H., 2001, "Location of rotating sources by phased array measurements", AIAA Paper 2001-2167.
8. Amiet, R.K., 1978, "Refraction of sound by a shear layer", *JSV* 8(2), pp. 467-482.
9. Schulten, J.B.H.M., 1997, "Computation of Aircraft Noise Propagation through the Atmospheric Boundary Layer", *Proc. 5th Int. Congress on Sound and Vibration*, Adelaide, Australië.
10. Oerlemans, S., Schepers, G., Guidati, G., en Wagner, S., 2001, "Experimental demonstration of wind turbine noise reduction through optimized airfoil shape and trailing-edge serrations", gepresenteerd op de "European Wind Energy Conference and Exhibition", Kopenhagen, Denemarken, 2-6 juli 2001.