

ANTI-GELUID EXPERIMENT IN DE FOKKER100

Elly H. Waterman en Jan V. Lankelma
Fokker Aircraft BV Postbus 7600, 1117 ZJ Schiphol

ACTIVE NOISE CONTROL EXPERIMENT IN THE FOKKER100 JET AIRCRAFT

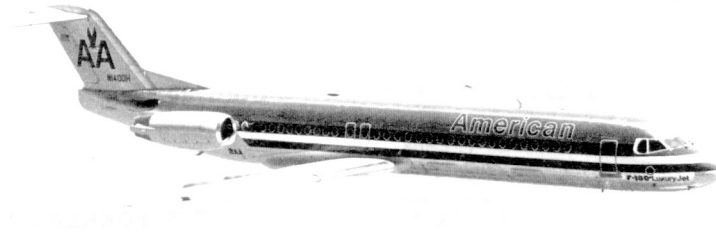
Summary: The noise levels in the cabin of the Fokker100 jet-type aircraft are very low in the forward and mid section. In the aft section, however, the level is less than ideal. The noise level in this area is dominated by structure-borne noise generated by the unbalance of the rotating parts within the engines. Active noise control, which has already successfully been applied in propeller aircraft, could be a tool to reduce this "unbalance" noise. In order to determine the potential noise reduction of active noise control an in-flight test has been performed with a small experimental active noise control system provided by TNO/TPD, consisting of 4 loudspeakers and 7 control microphones. The potential noise reduction of active noise control in jet aircraft was clearly demonstrated. However, it appears that in order to obtain a noise reduction in a substantial part of the aft cabin a considerable number of loudspeakers are required with a rather complex control system. It has been concluded that further research on control algorithms is needed to realize simultaneous control of the 4 independent engine tones which occur in jet-aircraft.

1 INLEIDING

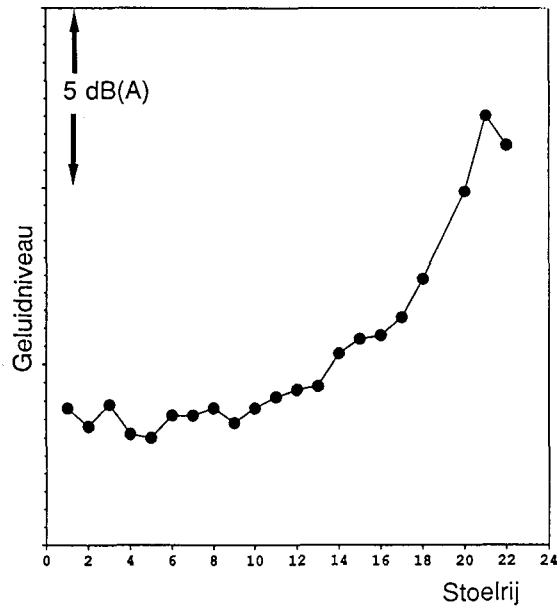
De Fokker100 is een straalvliegtuig voor de korte tot middellange afstand en kan maximaal 107 passagiers vervoeren (zie fig. 1). Het vliegtuig wordt aangedreven door twee Rolls Royce Tay motoren die achter aan de romp bevestigd zijn. Zowel in de cabine als buiten het vliegtuig behoort de Fokker100 tot de stilste vliegtuigen die momenteel op de wereld rondvliegen. Fokker streeft ernaar deze positie ten opzichte van concurrerende vliegtuigen te behouden en is daarom voortdurend bezig met onderzoek teneinde op termijn verdere verbeteringen te bereiken. Één van de punten van onderzoek betreft een studie naar de toepassingsmogelijkheden van anti-geluid.

Het voorste en middelste gedeelte van de Fokker 100 cabine is relatief stil. Op de achterste stoelrijen komen echter tot ca. 10 dB(A) hogere geluidsniveaus voor (zie fig. 2). Deze lokale verhoging van het geluidsniveau wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van de motoren. Binnen de motoren bevinden zich twee draaiende delen: een lage druk en een hoge druk rotor die worden aangeduid met N1 en N2 (zie fig. 3). Door de altijd aanwezige onbalans van deze rotoren wordt structure-borne geluid geproduceerd, dat door de romp van het vliegtuig naar de cabine wordt afgestraald. In het smalbandige geluidsspectrum van figuur 4 ziet men dan ook duidelijk de vier laagfrequente grondtonen die met de motoronbalans samenhangen. Uit deze figuur blijkt dat ook hogere harmonischen van de lage druk rotor (N1) een belangrijke bijdrage leveren.

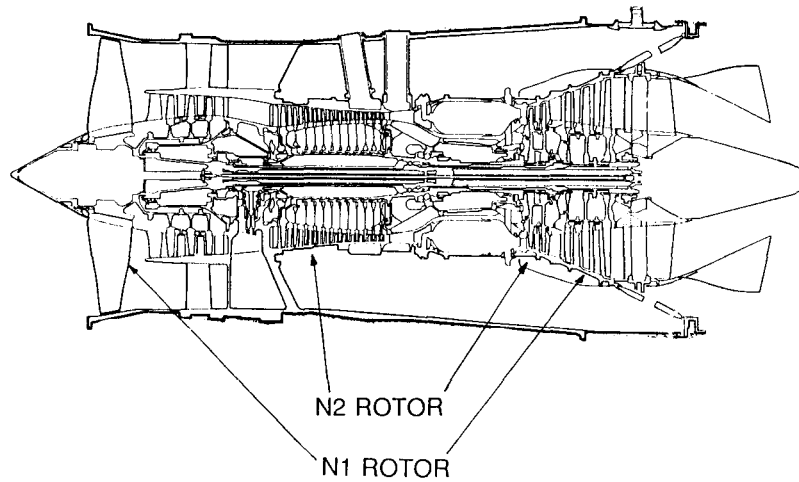
Conventionele methodes om het door de motoren geproduceerde geluid te bestrijden zijn in het ontwerp van de Fokker100 gerealiseerd. De motoren zijn op trillingsisolatoren



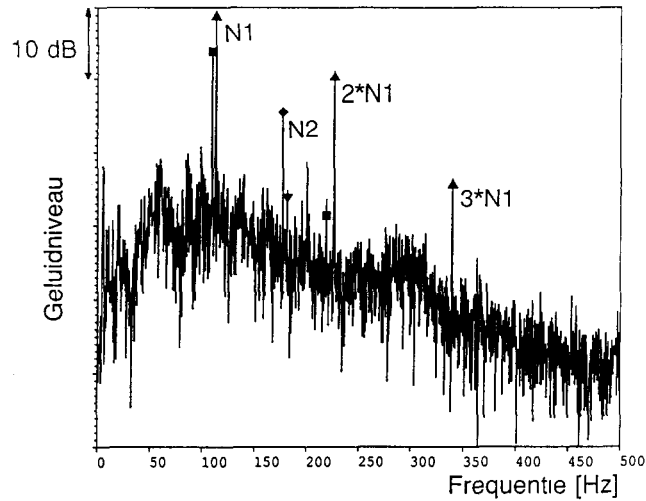
Figuur 1 De Fokker100.



Figuur 2 Verloop van het geluidsniveau in dB(A) in de cabine van de Fokker100, tijdens kruisvlucht op 33000 ft hoogte, met een snelheid van Mach 0.73 op de stoelen links bij het raam.



Figuur 3 Doorsnede van de Rolls Royce Tay turbofan motor. De roterende lage druk en hoge druk spoelen zijn aangegeven met respectievelijk N1 en N2.



Figuur 4 Smalbandig geluidsspectrum in het achterste gedeelte van de cabine van de Fokker100. De resolutie bedraagt 0.25 Hz. Met de symbolen worden de motortonen aangegeven als volgt:

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| ■ N1 van de rechter motor, | ▲ N1 van de linker motor |
| ◆ N2 van de rechter motor, | ▼ N2 van de linker motor |

De motortoerentallen zijn opzettelijk asynchroon ingesteld, teneinde deze apart zichtbaar te maken.

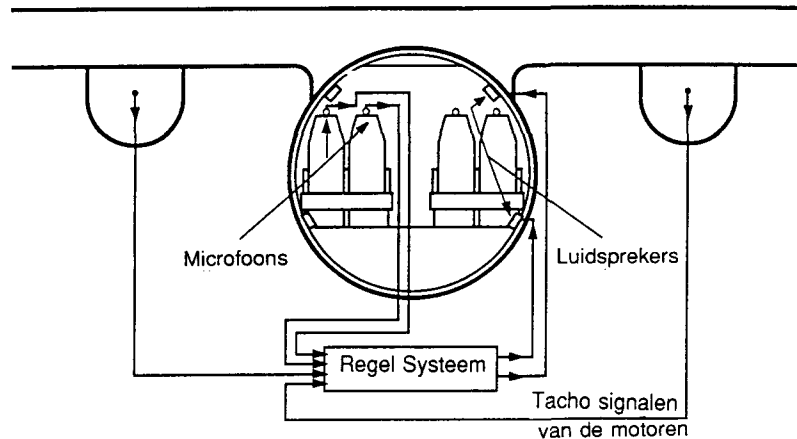
gemonteerd en de interieurpanelen zijn flexibel opgehangen teneinde de geluidafstraling zoveel mogelijk te beperken. Verdere reductie van geluid veroorzaakt door de N1 rotor wordt bereikt door zo goed mogelijk te balanceren. De N2 rotor is na samenstellen van de complete motor echter niet meer bereikbaar en kan daardoor niet meer op het vliegtuig gebalanceerd worden. Hoewel met deze maatregelen momenteel een acceptabel geluidsniveau bereikt wordt streeft Fokker voor de toekomst naar een verdere geluidreductie. Omdat het geluid gedomineerd wordt door zuivere tonen met een lage frequentie zou anti-geluid hiervoor een uitstekend middel kunnen zijn.

Na een vooronderzoek binnen het Brite/Euram project ASANCA is een verkennende test in een Fokker100 uitgevoerd, samen met de Technische Fysische Dienst van TNO.

2 ANTI-GELUID IN EEN VLIEGTUIGCABINE

Met een anti-geluidssysteem wordt het geluid op een aantal meetposities (de controle microfoons) gereduceerd door middel van geluid dat in tegenfase gegenereerd wordt door een aantal luidsprekers. De luidsprekers worden aangestuurd door een controle systeem dat hiervoor in het algemeen informatie over de te controleren tonen nodig heeft. Deze informatie wordt gehaald uit bijvoorbeeld toerental signalen van de motoren. Een schema van een mogelijk anti-geluidssysteem is gepresenteerd in figuur 5.

De controle microfoons worden geplaatst in de zone waar de grootste geluidreductie nodig is en zouden bijvoorbeeld verwerkt kunnen worden in de hoofdsteunen van de stoelen voor de passagiers. De luidsprekers kunnen bijvoorbeeld in de interieur-wanden van de cabine gemonteerd worden.



Figuur 5 Mogelijke configuratie van een anti-geluid systeem in een vliegtuig cabine.

In de ideale situatie zijn het heersende (primaire) veld en het anti-geluid (secundaire) veld precies met elkaar in tegenfase op alle lokaties in het vliegtuig en zal er perfecte uitdoving optreden. Om deze ideale situatie zo goed mogelijk in de praktijk te realiseren kunnen de aantallen en de lokaties van de controle-microfoons en de luidsprekers geoptimaliseerd worden. De hiervoor benodigde kennis heeft Fokker verkregen via het ASANCA project.

3 HET ASANCA PROJECT

Om te bepalen hoe een optimaal anti-geluid systeem er voor de Fokker 100 uit zou moeten zien zijn twee experimenten uitgevoerd. Het heersende primaire veld is tijdens een testvlucht gemeten op een groot aantal meetlokaties binnen de cabine. Verder zijn van een aantal mogelijke luidspreker-posities de secundaire velden bepaald. Vervolgens is een rekenprogramma ontwikkeld waarmee de posities van zowel de luidsprekers als de microfoons geoptimaliseerd kunnen worden met behulp van de gemeten gegevens.

3.1 Bepaling primaire veld door middel van vluchtmetingen

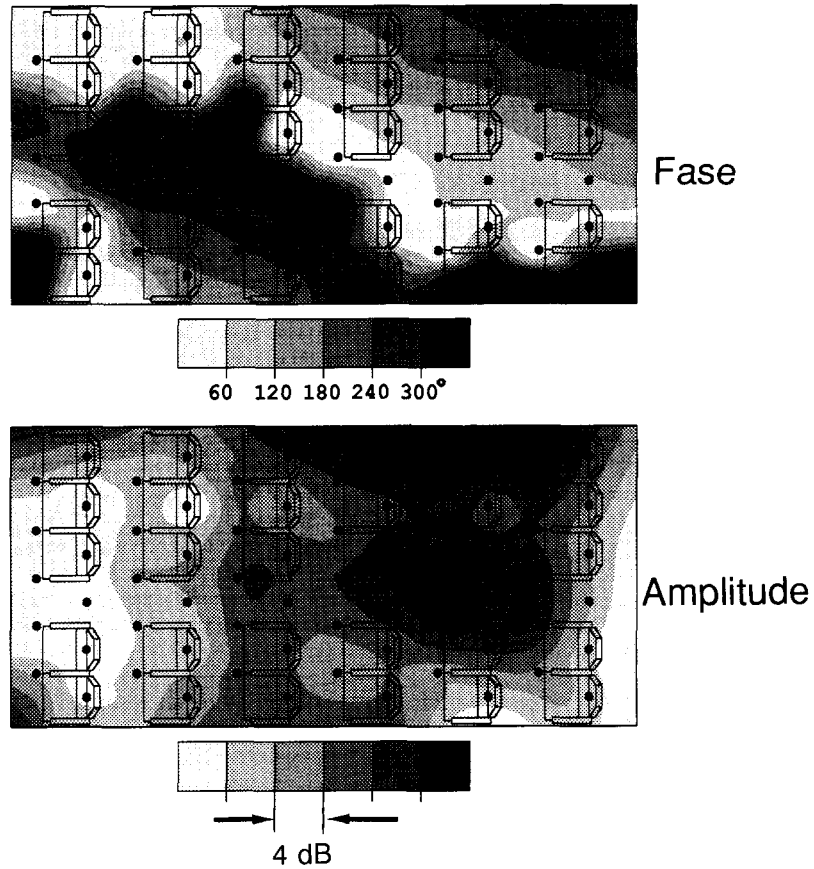
Tijdens een testvlucht zijn de primaire velden van de belangrijkste motortonen bepaald. De motoren draaiden tijdens de metingen asynchroon om de velden, veroorzaakt door de linker en rechter motor, te kunnen onderscheiden. De amplitude en fase van deze velden is drie-dimensionaal gemeten op 574 posities bij de achterste 7 stoelrijen van het vliegtuig. De fase van de primaire velden is bepaald ten opzichte van de toerental signalen van de motor.

Een voorbeeld van het gemeten primaire veld van de N1 toon is gegeven in figuur 6. Uit deze figuur blijkt dat het N1 veld van deze motor gelijkenis vertoont met een lopende golf die uit één hoek van de cabine voortkomt.

3.2 Bepaling secundaire velden door middel van grondmetingen

Teneinde optimalisatie berekeningen te kunnen uitvoeren zijn de transferfuncties bepaald tussen diverse mogelijke microfoon en luidspreker posities. Deze metingen zijn in de cabine van het vliegtuig uitgevoerd met motoren uit, dus zonder aanwezigheid van het primaire veld. De totale omvang van deze metingen moest enigszins beperkt worden en daarom zijn de transferfuncties bepaald voor "slechts" 42 mogelijke luidsprekerposities. Het was niet mogelijk het 3-dimensionale secundaire veld van elke mogelijke luidsprekerpositie te bepalen. Daarom is het aantal mogelijke controle microfoon posities beperkt tot 66, gepositioneerd in een horizontaal vlak op oorhoogte van zittende passagiers.

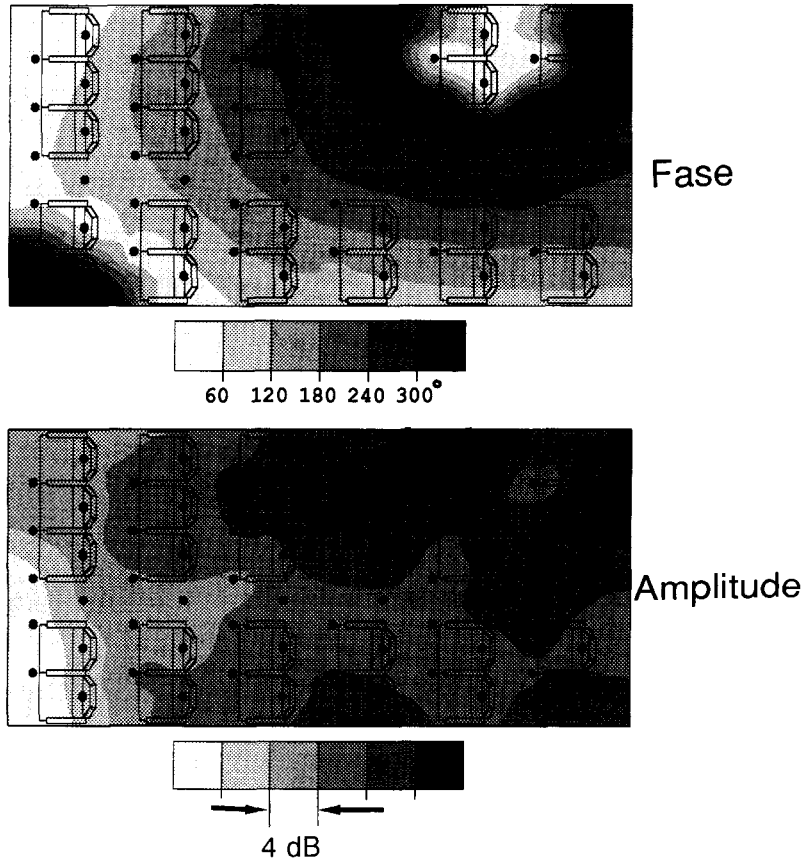
Ter illustratie zijn in figuur 7 en 8 de secundaire velden afgebeeld van twee luidsprekerposities, eveneens bij de N1 toon van de rechter motor. Uit deze figuren blijkt dat het secundaire veld van figuur 7 veel beter "past" bij het primaire veld (fig. 6) dan het secundaire veld van figuur 8. Met de eerstgenoemde luidspreker lokatie zal daarom een geluidreductie over een groter deel van de cabine bereikt kunnen worden.



Figuur 6 Primair veld van de N1 toon van de rechter motor ter plaatse van de 6 achterste stoelrijen in de Fokker100, in het horizontale vlak op oorhoogte van zittende passagiers. Met de punten worden de meetlokaties weergegeven. De donkere tonen geven hogere geluidniveaus aan dan de lichte tinten.

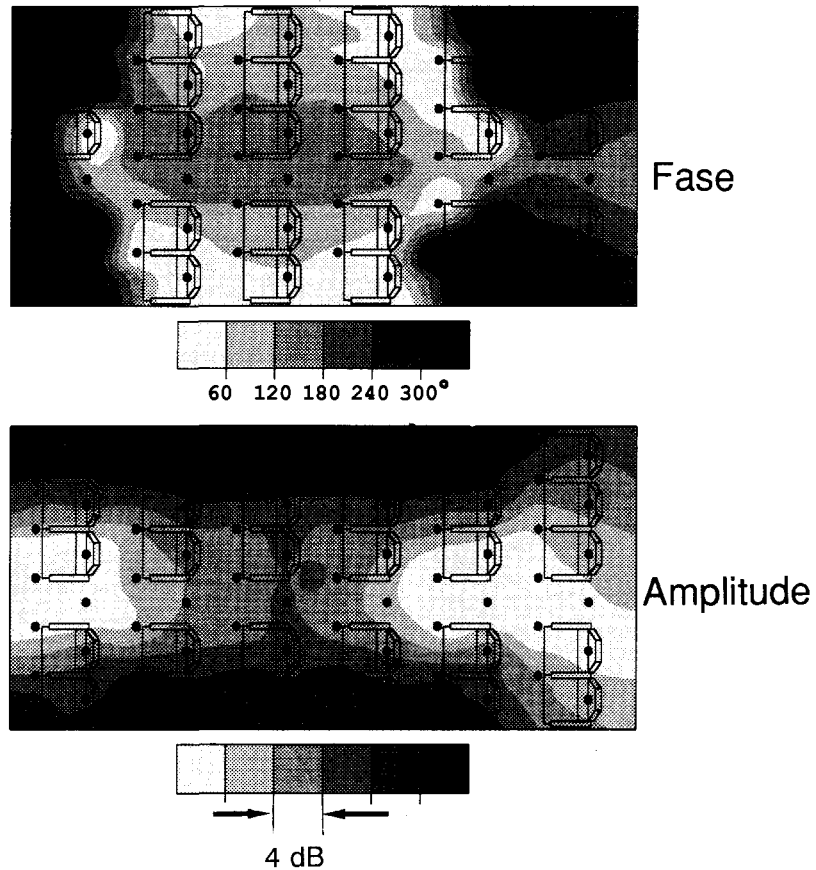
3.3 Optimalisatie berekeningen

Op basis van de gemeten primaire velden en transferfuncties is voor elke van belang zijnde motortoon een schatting gemaakt van de te behalen geluidreductie als functie van het aantal luidsprekers. Voor het bepalen van de optimale opbrengst zou men als criterium de geluidreductie op de controle microfoons kunnen nemen (lokale reductie). Het verdient echter de voorkeur om te kijken naar de “globale reductie”, dat wil zeggen de gemiddelde reductie van alle beschikbare meetlokaties in de cabine.



Figuur 7 Secundair N1 geluidsveld van een luidspreker geplaatst op de vloer van de cabine, rechts boven in de figuur.

De berekeningen om de optimale lokaties te bepalen zijn uitgevoerd met door Fokker ontwikkelde software. Bij de berekeningen is aangenomen dat de transferfuncties die op de grond gemeten zijn, gelijk zullen zijn aan die tijdens een vlucht.



Figuur 8 Secundair N1 geluidsveld van een luidspreker geplaatst op de vloer van de cabine, midden boven in de figuur.

Met de beschikbare grote hoeveelheid gemeten data van 42 mogelijke luidsprekerposities is het niet mogelijk om de "echte" optimale configuratie te bepalen. Het aantal manieren om bijvoorbeeld 24 luidsprekers te kiezen uit de beschikbare 42 bedraagt namelijk:

$$\binom{42}{24} \approx 10^{11}$$

Het narekenen van al deze mogelijkheden ligt ver boven de capaciteit van elke computer. Er zijn daarom verschillende methoden ontwikkeld om het optimum benaderen. De meest eenvoudige methode is te beginnen met de luidspreker die de beste globale reductie oplevert en vervolgens stap voor stap opnieuw de beste lokatie toe te voegen. Op deze manier wordt het aantal te berekenen configuraties beperkt tot:

$$\sum_{i=1}^{24} (43 - i) = 732$$

Voor elke configuratie van luidsprekers en microfoons wordt het functioneren van het anti-geluidstelsel gesimuleerd. Hiertoe wordt het totale secundaire geluidsveld opgeteld bij het primaire veld met optimale amplitude en fase. De optimale aansturing x van alle luidsprekers volgt uit:

$$Ax = b$$

Hierin is:

A	de transfermatrix	[Pascal/Ampère]
b	de primaire veld vector, 180 graden gedraaid	[Pascal]
x	de onbekende aansturings-vector	[Ampère]

Al deze grootheden zijn uiteraard complex. Het aantal elementen van x is gelijk aan het aantal luidsprekers. Het aantal elementen van b is gelijk aan het aantal controle microfoons. Indien het aantal luidsprekers gelijk is aan het aantal controle microfoons is de matrix A vierkant en is het stelsel exact oplosbaar.

In het algemeen gebruikt men echter liever meer controle microfoons dan luidsprekers, omdat het regelsysteem hiermee stabiel wordt. De matrix A wordt dan rechthoekig waardoor een exacte oplossing niet meer bestaat. Men probeert dan x zodanig te kiezen dat met Ax de vector b zo goed mogelijk benaderd wordt. Dit gebeurt met de kleinste-kwadraat methode als volgt:

$$x = (A^*A)^{-1}A^*b$$

Hierin is A^* de Hermitisch getransponeerde van A .

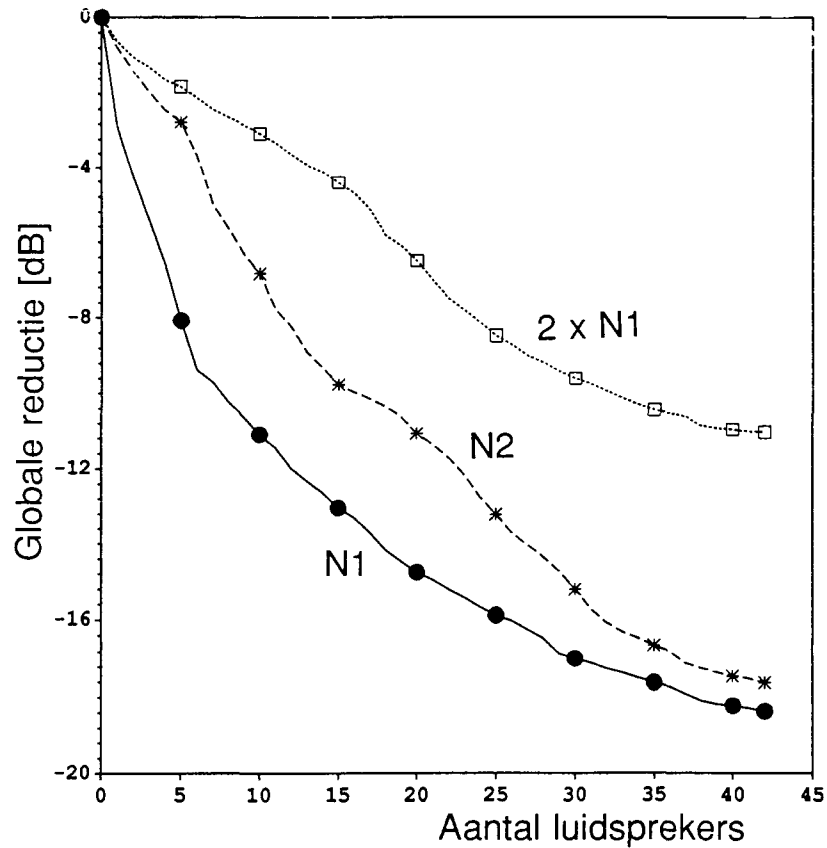
Figuur 9 toont het met deze methode berekende resultaat voor de motortonen van de rechter motor, als functie van het aantal luidsprekers. In deze figuur is duidelijk te zien dat de geluidreductie sterk kan verschillen per motortoontoon. De voorspelde geluidreducties voor de linker motor zijn ongeveer gelijk aan die van de rechter motor.

Uit deze reken-resultaten blijkt dat zelfs met een vrij klein systeem een aanzienlijke reductie bereikt zou kunnen worden van met name de N1 toon. Deze conclusie was de aanleiding om een verificatie experiment uit te voeren in de Fokker100 met behulp van een bij TNO/TPD beschikbaar anti-geluid systeem.

4 ANTI-GELUID EXPERIMENT IN DE FOKKER 100

4.1 Luidspreker lokaties

Met behulp van bovengenoemde software en meetgegevens zijn gunstige luidspreker configuraties bepaald voor het experiment. In het algemeen zijn de optimale configuraties voor iedere motortoontoon verschillend. Tijdens de metingen zijn drie verschillende configuraties toegepast, namelijk optimaal voor N1, de N2 en de combinatie van N1 en N2 van



Figuur 9 Verband tussen de "optimale globale" geluidreductie op 66 lokaties en aantal luidsprekers voor diverse motortonen van de rechter motor.

de rechter motor. Voor het kiezen van de 4 luidsprekerlokaties voor elke test werd als criterium de beste globale reductie op de 4 achterste stoelrijen gebruikt.

4.2 Microfoon posities

De posities van de 7 controle microfoons zijn eveneens bepaald op basis van de ASANCA metingen. Ook deze posities waren verschillend voor de drie geteste configuraties. De posities zijn steeds zo gekozen, dat bij elke optimale luidspreker configuratie wederom de beste globale reductie werd verkregen op de achterste 4 stoelrijen.

4.3 Het anti-geluid systeem Octopus

De verificatie metingen zijn uitgevoerd met het door TNO/TPD ontwikkelde anti-geluidstelsysteem Octopus. Dit systeem bestaat uit een controller die wordt bestuurd via een PC. Het anti-geluid wordt geproduceerd door 4 luidsprekers, waarbij de geluidsdruk op 7 controle microfoons door de controller wordt geminimaliseerd. Als invoer heeft het systeem een toerental signaal van de motor nodig. Het systeem is in staat om één motortoonaan inclusief harmonischen tegelijkertijd te controleren, hoewel er geprobeerd is door middel van eenvoudig sommeren van twee toerental signalen een reductie bij twee tonen tegelijk te verkrijgen.

Voordat het anti-geluidstelsysteem kan werken moet het effect van de individuele luidsprekers op de diverse controle microfoons worden bepaald. Er zijn twee methoden onderzocht: de “conventionele” systeemidentificatie en de “efficiënte” systeemidentificatie. De “conventionele” systeemidentificatie bepaalt de complete transferfunctie tussen elke luidspreker en elke microfoon door middel van een ruissignaal. De “efficiënte” systeemidentificatie bepaalt alleen de transferfunctie bij de te regelen frequentie door middel van een pure toon. De efficiënte methode is uiteraard sneller, maar minder nauwkeurig bij veranderende omstandigheden. Beide methoden zijn “off-line”, hetgeen wil zeggen dat de systeemidentificatie wordt uitgevoerd vóórdat het systeem in werking treedt.

Voor het produceren van het anti-geluid wordt binnen het systeem een algoritme gebruikt. Hiervoor zijn twee methodes op hun effectiviteit beoordeeld tijdens de metingen, namelijk Filtered-X LMS en Modified Filtered-X LMS. Laatstgenoemde methode is waarschijnlijk sneller dan de eerste, maar is nog experimenteel. Bij de metingen is ook onderzocht hoe stabiel het systeem blijft onder veranderende omstandigheden zoals variaties van de motor toerentallen, cabine-druk en temperatuur.

4.4 Meetprogramma

Tijdens de metingen was behalve de Octopus ook meetapparatuur van Fokker aan boord voor onafhankelijke geluidregistratie. Hierdoor zijn behalve informatie over de geluidreductie op de controle microfoons ook gegevens beschikbaar gekomen van andere meetlocaties. De meetprocedure voor de diverse tests bestond telkens uit de volgende 3 acties:

1. Bepaling van het heersende (primaire) veld, zonder anti-geluid.
2. Systeem identificatie.
3. Bepaling van het residue veld, met toepassing van anti-geluid.

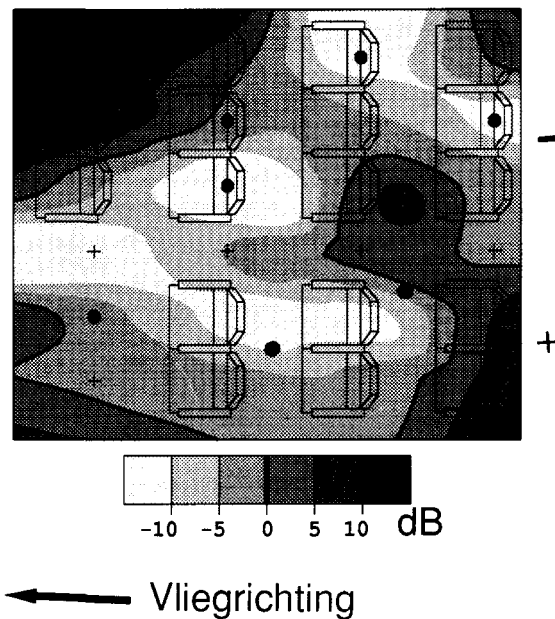
Van de door Fokker geregistreerde metingen zijn Fourier-analyses gemaakt met een bandbreedte van 640 Hz en een resolutie van minimaal 1 Hz, teneinde de tonen van de linker en rechter motor te kunnen scheiden. Bij meetcondities met exact synchroon draaiende motoren kunnen de beide tonen natuurlijk niet worden gescheiden. Met behulp van de eveneens tijdens de metingen geregistreerde motortoerentallen zijn via een geautomatiseerd proces de “pieken” behorende bij de motortonen uit de Fourier spectra gelokaliseerd. Uit deze waarden konden vervolgens de lokale en globale geluidreducties berekend worden.

5 MEETRESULTATEN

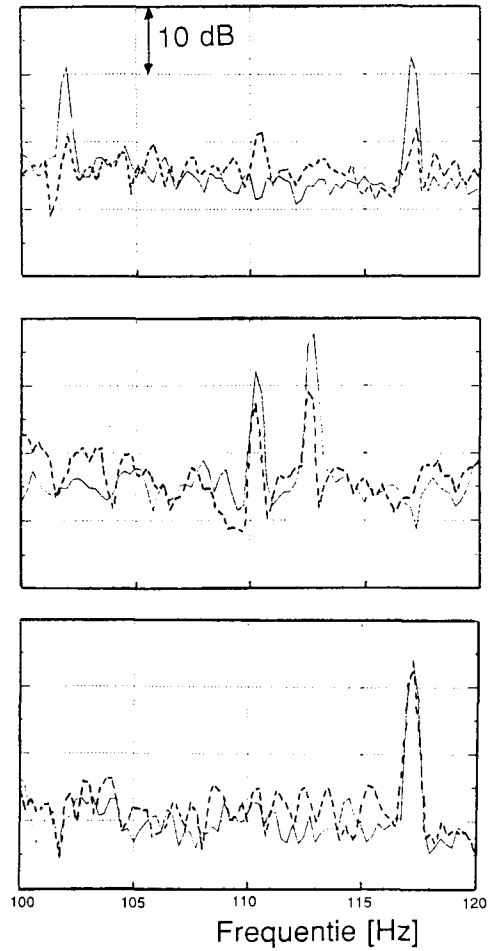
5.1 Geluidreductie

De experimenten hebben aangetoond dat in de directe omgeving van de controle microfoons een grote reductie van de motortonen haalbaar is. Met de onafhankelijke microfoons zijn reducties van meer dan 10 dB gevonden. De geluidreducties gemeten met de op het controle systeem aangesloten microfoons waren nog groter. Ook tussen de controle microfoons werden over het algemeen grote geluidreducties gevonden. Buiten het gebied van de controle microfoons trad echter een lokale toename van het geluid op (zie fig. 10).

Uit deze resultaten blijkt dat de voorspellingen niet volledig in het vliegtuig gerealiseerd worden. Een oorzaak hiervan zou kunnen zijn dat de transferfuncties waarop de berekeningen gebaseerd waren niet representatief zijn. Een andere mogelijkheid is dat het primaire veld gemeten in het voor het ASANCA project gebruikte vliegtuig niet geheel representatief was. Teneinde een voldoende reductie op de achterste stoelrijen van de cabine te verkrijgen zal daarom een groter anti-geluid systeem nodig zijn.



Figuur 10 Contour plotje van de gemeten geluidreductie voor de N1 frequentie op de 4 achterste stoelrijen van de Fokker100. Binnen de dikke lijn treden geluidreducties op; buiten de dikke lijn worden toenames gevonden. De lokaties van de controle microfoons zijn aangegeven met ●.



Figuur 11 Resultaten van een experiment voor het genereren van anti-geluid voor 2 motortonen tegelijkertijd, namelijk de N1 toon van de linker en de rechter motor. Het betreft het gemiddelde geluidsniveau op de controle microfoons. (Figuur afkomstig van TNO/TPD).

Boven: Motortonen ca. 15 Hz in frequentie gescheiden
 Midden: Motortonen ca. 2 Hz in frequentie gescheiden
 Onder: Synchron draaiende motoren

----- Met anti-geluid ——— Zonder anti-geluid

5.2 Stabiliteit van het systeem

Uit het experiment is gebleken dat het geteste anti-geluid systeem ongevoelig is voor druk en temperatuur veranderingen in de cabine en voor snelle variaties van het motortoerental zoals die in de vlucht kunnen voorkomen. Voor deze experimenten is uiteraard de “conventionele” systeemidentificatie toegepast.

5.3 Meerdere tonen tegelijkertijd

Er is een eerste verkennend experiment uitgevoerd om te bekijken of het gebruikte anti-geluid systeem meerdere motortonen tegelijkertijd zou kunnen reduceren. Hiertoe zijn de toerental signalen van de N1 rotor van de linker en rechter motor bij elkaar opgeteld. De resultaten zijn weergegeven in figuur 11. Uit deze figuur blijkt dat deze methode goed werkt indien de twee motortonen een groot verschil in frequentie hebben. Bij een kleiner toerentalverschil wordt de geluidreductie veel minder, en bij synchroon draaiende motoren blijkt geheel geen geluidreductie meer te worden verkregen.

6 CONCLUSIES

De experimenten hebben aangetoond dat anti-geluid succesvol kan worden toegepast in de cabine van een straalvliegtuig zoals de Fokker100. Om een goede geluidreductie te verkrijgen voor alle motortonen op alle zitplaatsen achter in de Fokker 100 zal echter een vrij groot systeem nodig zijn. Hierbij moet gedacht worden aan een systeem zoals dat is ontwikkeld binnen het ASANCA project met 32 luidsprekers and 48 microfoons [1]. Met de huidige technologie blijkt het niet mogelijk te zijn om succesvol anti-geluid te produceren voor meerdere onafhankelijke motortonen tegelijkertijd indien deze een vrijwel gelijke frequentie hebben. Hiervoor zal verder onderzoek nodig zijn. Mede door het grote aantal benodigde luidsprekers is het bovendien van groot belang dat er verder onderzoek wordt verricht naar het reduceren van de afmetingen en het gewicht van de luidsprekers.

7 DANKBETUIGING

Het ASANCA project is uitgevoerd met steun van de Europese Gemeenschap. Aan dit project werd deelgenomen door de Europese vliegtuigfabrikanten Dornier, Fokker, Saab en Alenia. De diverse metingen werden verricht door Metravib en LMS. Er zijn controle systemen ontwikkeld door TNO/TPD en MS2I. Verdere medewerking aan het project is verleend door: IST, Univ. Patras, CNRS, KUL, Trinity College, Captec en Reson Systems.

8 LITERATUUR

1. Borchers, I.U. et al., 1993. Selected flight test data and control system results of the CEC Brite/Euram ASANCA study, *Proceedings Inter Noise 93*, Leuven, Vol. 1, 59-64.