

TNO Industrie en Techniek

ONGERUBRICEERD

Schoemakerstraat 97
Postbus 6033
2600 JA Delft

www.tno.nl

T +31 15 269 63 60
F +31 15 262 07 66
info-ient@tno.nl

TNO-rapport

Evaluatie van antigeluid voor toepassing in binnenvaartschepen

Datum	9 april 2009
Auteur(s)	Dr. ir. A. P. Berkhoff ir. M.G. Dittrich J. van 't Hof
Opdrachtgever	Expertise- en Innovatiecentrum Binnenvaart (EICB)
Projectnummer	033.15617
Rubricering rapport Titel Samenvatting Rapporttekst Bijlagen	Ongerubriceerd
Aantal pagina's Aantal bijlagen	30 (incl. bijlagen)

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2009 TNO

ONGERUBRICEERD

Inhoudsopgave

Bijlage(n)

A ANC Controller Data *****

B ANC Controller Data *****

1	Inleiding.....	3
2	Laboratoriumproeven	4
3	ANC test aan boord van de *****	5
3.1	ANC Systeem	5
3.2	Meetprocedure en motorcondities.....	6
3.3	Meetresultaten.....	7
4	ANC test aan boord van de *****	11
4.1	ANC System	11
4.2	Meetprocedure en motorcondities.....	12
4.3	Meetresultaten.....	12
5	ANC en passieve maatregelen.....	19
6	Conclusies en aanbevelingen.....	20
7	Literatuur	21
8	Referenties	Error! Bookmark not defined.
9	Ondertekening.....	22

Bijlage(n)

A ANC Controller Data *****

B ANC Controller Data *****

1 Inleiding

TNO heeft in opdracht van het Expertise- en Innovatiecentrum Binnenvaart (EICB) een evaluatie gemaakt van de mogelijke toepassing van antigeluid in verblijfsruimtes aan boord van binnenvaartschepen. Dit rapport beschrijft de uitgevoerde metingen op twee verschillende schepen, de analyse, resultaten en aanbevelingen voor toepassingen van antigeluid.

Achtergrond

In de Nederlandse binnenvaart zijn er enkele honderden oudere schepen die mogelijk uit de vaart worden genomen indien zij niet meer aan de wettelijke geluidseisen voldoen. Met name de oudere dieselmotoren zijn een belangrijke bron van het lawaai en trillingen aan boord. Bij lage motortoerentallen kunnen geluidsniveaus van 80-90 dB(A) voorkomen in woonkamers, slaapkamers, keukens en stuurhut. Bij hoge snelheden kan het geluidsniveau oplopen tot 100 dB(A) of meer. Continue blootstelling aan dergelijke niveaus is schadelijk voor het gehoor. Veel van deze schepen zijn eigendom van individuele ondernemers die vaak ook met hun gezin op het schip wonen en werken.

Alle binnenvaartschepen dienen in 2015 te voldoen aan de wettelijke geluidseisen voor verblijfsruimtes aan boord, anders moeten ze worden vervangen door nieuwe schepen met een prijs van ca. 1,5 miljoen Euro. Dit bedrag is voor een kleine ondernemer moeilijk op te brengen, daarom heeft EICB TNO benaderd met de vraag of antigeluid een mogelijke oplossing kan bieden om het geluidsniveau te reduceren.

Door TNO is gesteld dat antigeluid alleen onvoldoende zal zijn om het totale dB(A)-niveau te reduceren omdat antigeluid het beste werkt bij lage frequenties, onder 500 Hz. Echter, de combinatie van antigeluid en passieve maatregelen kunnen mogelijk tot een wezenlijke kostenbesparing op passieve maatregelen leiden. Daarbij moet worden gedacht aan de verende opstelling van de motor en aanpassing van uitlaatsystemen. EICB heeft gekozen eerst de mogelijkheden van antigeluid te onderzoeken.

Doel en werkwijze

Doel van het onderzoek was het kwantificeren, door middel van proeven, van de geluidreductie in verblijfsruimten aan boord van binnenvaartschepen door het toepassen van ANC zonder dat voorafgaand aan de ANC proeven ook passieve maatregelen op het schip zijn uitgevoerd.

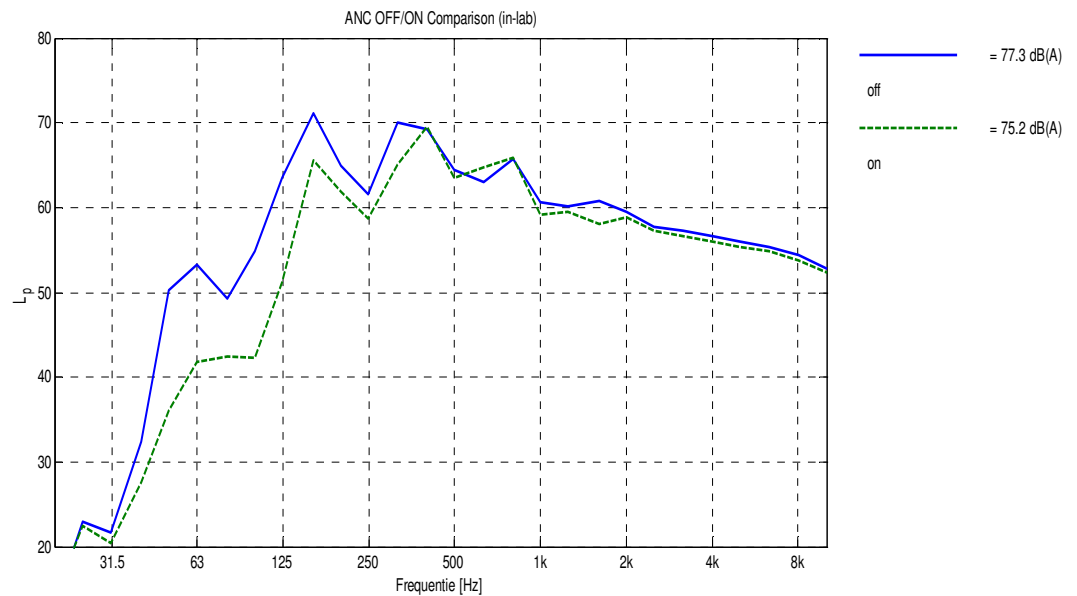
De werkzaamheden omvatten het volgende.

- Proeven en geluidmetingen met een ANC systeem op twee schepen, één met laag en één met hoog toerental, in twee verblijfsruimtes. Voorafgaand aan de ANC proeven op beide schepen is onderzocht wat het meest optimale regelalgoritme is. Dit werd in het laboratorium onder gesimuleerde condities uitgevoerd. Hierbij is tevens een schatting gemaakt van de microfoonposities en benodigde luidsprekers.
- Analyse van de geluidmetingen en ANC proeven en genereren van aanbevelingen voor het toepassen van ANC als geluidreducerende maatregel in verblijfsruimtes van binnenvaartschepen, met een inschatting van de haalbare geluidreducties. Daarbij wordt een indicatie gegeven van de nodige passieve maatregelen en de te verwachten gecombineerde geluidreductie bij toepassing van ANC.

2 Laboratoriumproeven

Een eerste analyse van de geluidskarakteristieken is in het laboratorium uitgevoerd met behulp van eerder opgenomen geluidsoptnames aan boord van twee binnenvaartschepen, ***** and *****, in de keuken, woonkamer, slaapkamer en stuurhut. Het geluid werd in een testkamer afgespeeld via een grote luidspreker, waarmee realistische geluidniveaus konden worden geproduceerd.

Luidsprekers en microfoons voor het antigeluidstelsel zijn op enkele posities in de testkamer geplaatst. Een eerste ANC simulatie is uitgevoerd om na te gaan hoeveel geluidreductie te verwachten is. In figuur 2.1 staat een voorbeeld van de behaalde reductie, variërend van ca. 10 dB rond 63 Hz tot ca. 5 dB rond 160 Hz en 2-3 dB rond 250 Hz. De reductie op het totale dB(A)-niveau tengevolge van antigeluid is hier 2,1 dB(A). Boven 300 Hz zijn de reducties klein, waaruit geconcludeerd wordt dat passieve maatregelen boven deze frequentie nodig zijn om het totale dB(A)-niveau substantieel verder te verlagen.



Figuur 2.1: Simulatie resultaten in de testkamer van opgenomen geluid aan boord bij vrijloop met ANC aan en uit, A-gewogen geluiddrukkniveaus.

3 ANC test aan boord van de *****

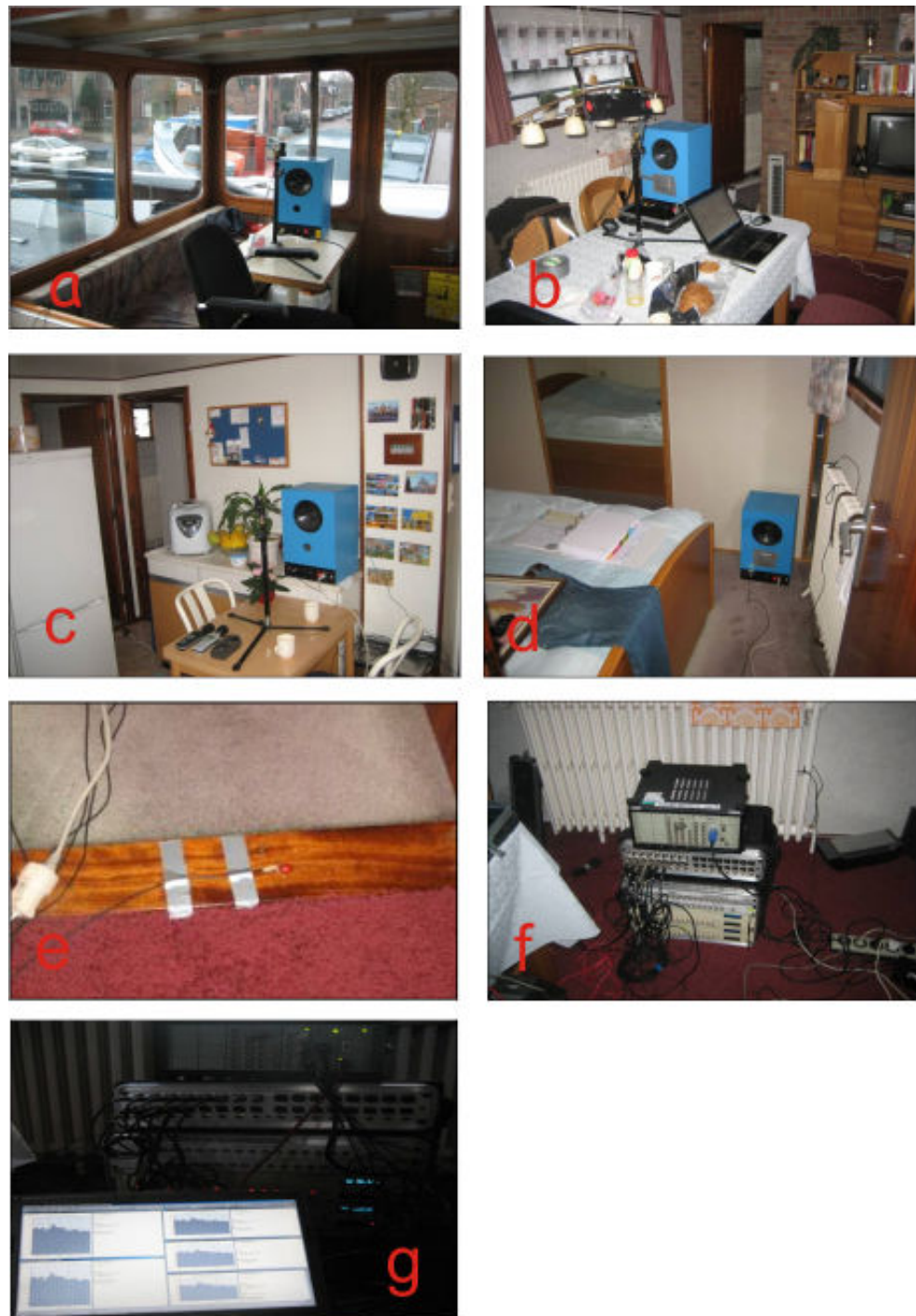
Op 21 januari 2009, zijn metingen en ANC tests aan boord van de ***** uitgevoerd. Wegens de beperkte toegankelijkheid kon slechts een deel van de benodigde apparatuur aan boord worden gebracht. Dit bestond uit:

- een ANC controller;
- twee laptops;
- B&K PULSE analyser;
- vier luidsprekers (in plaats van de 8 voorzien); één in iedere verblijfsruimte: de stuurhut, de woonkamer, de keuken en de slaapkamer;
- één microfoon in iedere verblijfsruimte;
- twee versnellingsopnemers in de woonkamer (Endevco M50);
- alle bekabeling, stroomvoorziening en andere hulpapparatuur.

Figuur 3.1: Binnenvaartschip ***** , rechts van *****.

3.1 ANC Systeem

Het ANC systeem werd opgesteld met in iedere verblijfsruimte (4) één luidspreker en één microfoon centraal gepositioneerd. Vier invoerkanalen van de Inmar-r2-2 ANC controller waren aangesloten op de 4 foutmicrofoons en twee versnellingsopnemers. Daarnaast werd een kleine microfoonarray geplaatst bestaande uit vijf microfoons op 10 cm afstand van elkaar, met de eerste microfoon ter hoogte van de foutmicrofoon van het ANC systeem. Dit array is gebruikt om de uitdoving als functie van afstand tot de foutmicrofoon te bepalen, en om directe geluidopnames te maken met het PULSE-systeem. Het regelsysteem werd in de woonkamer geplaatst.



Figuur 3.2: Fotoserie, a) stuurhut, b) woonkamer, c) keuken, d) slaapkamer, e) versnellingsopnemers in woonkamer, f) B&K PULSE, Inmar-r2-2 ANC controller, PCB microfoon conditioner, g) gemeten 1/3-octafbandspectra met de microfoonarray tijdens de vaart.

3.2 Meetprocedure en motorcondities

Op de ***** waren vooraf de volgende metingen gepland:

1. *Motor uit (stilte) – calibratie*

Bepaling van de impulsresponsies van de verblijfsruimtes en verificatie van de correcte afstand van de microfoons en luidsprekers.

2. Motor bij vrijloop, constant toerental

Testen van het ANC systeem, beoordeling resultaten, terug naar stap 1 indien nodig.

3. Motor bij constant laag toerental

Testen van het ANC systeem, beoordeling resultaten, parameters instellen of stap 2 herhalen.

4. Motor bij constant hoog toerental

Testen van het ANC systeem, beoordeling resultaten, parameters instellen of stap 2 en 3 herhalen.

5. Betrouwbaarheid verhogen

Vergroting aantal luidsprekers en foutmicrofoons, herhaling van stappen 1-4 tot bevredigende resultaten worden behaald.

3.3 Meetresultaten

De ANC experimenten zijn uitgevoerd in vier verblijfsruimtes: de stuurhut, de woonkamer, de keuken en de slaapkamer. In iedere ruimte stond één middenfrequentluidspreker en één foutmicrofoon opgesteld die met het centrale ANC regelsysteem in de woonkamer in verbinding stonden. De afstand tussen de microfoon en de luidspreker varieerde afhankelijk van de ruimte tussen de 30 cm en 150 cm.

3.3.1 *Vrijloop*

De ANC experimenten tijdens vrijloop zijn uitgevoerd tijdens het varen waarbij de schroef niet werd aangedreven. In de woonkamer zijn tijdens de ANC experimenten met het array van microfoons de geluiddrukkniveaus gemeten.

De figuren 3.3a en 3.3b geven de gemeten 1/3 octaafband geluiddrukkniveaus met en zonder ANC weer, respectievelijk ongewogen en A-gewogen. Deze zijn gemeten op de eerste microfoon van het array, dichtbij bij de foutmicrofoon van het ANC regelsysteem. De legenda in de figuren geeft het totale geluidniveau in dB en dB(A) weer in de situaties met ANC uit en aan.

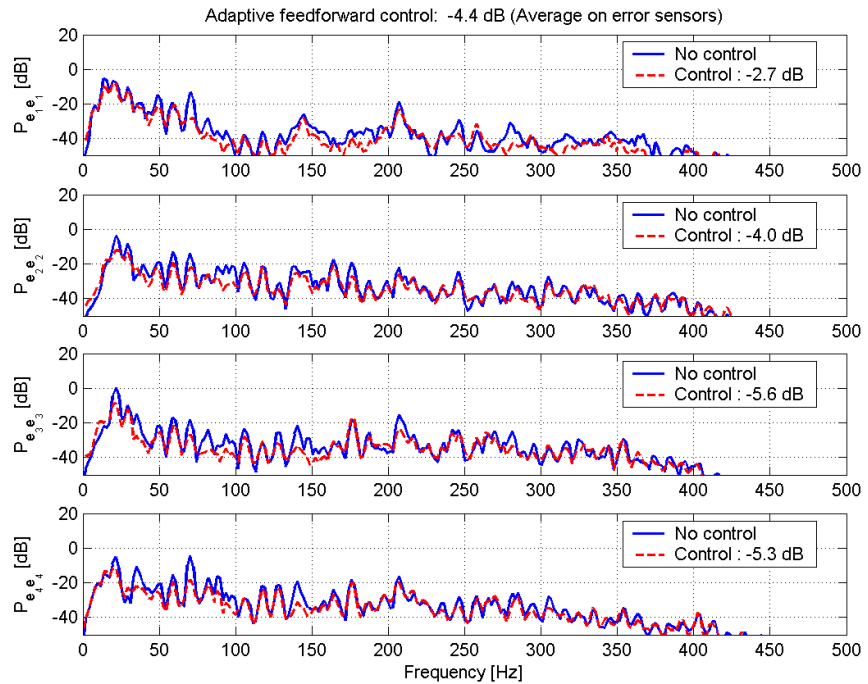
Figuur 3.3a: Ongewogen geluiddrukkniveaus in de woonkamer van de ***** bij motor vrijloop, met en zonder ANC.

Figuur 3.3b: A-gewogen geluiddrukkniveaus in de woonkamer van de ***** bij motor vrijloop, met en zonder ANC.

3.3.2 *Laag toerental*

Het ANC experiment op laag toerental met aangedreven schroef is aansluitend aan het experiment in vrijloop uitgevoerd. Door omstandigheden was het niet mogelijk om geluidmetingen te doen met de microfoons van het array. Figuren van gemeten geluiddrukkniveaus in 1/3 octaafband, ongewogen en A-gewogen kunnen daarom niet worden gepresenteerd. Figuur 3.4 geeft een overzicht van de gemeten smalbandig ongewogen geluiddrukkniveaus op de foutmicrofoon van 0 tot 500 Hz, vastgelegd door de ANC controller, in de verschillende verblijfsruimtes bij laag toerental. In deze figuren

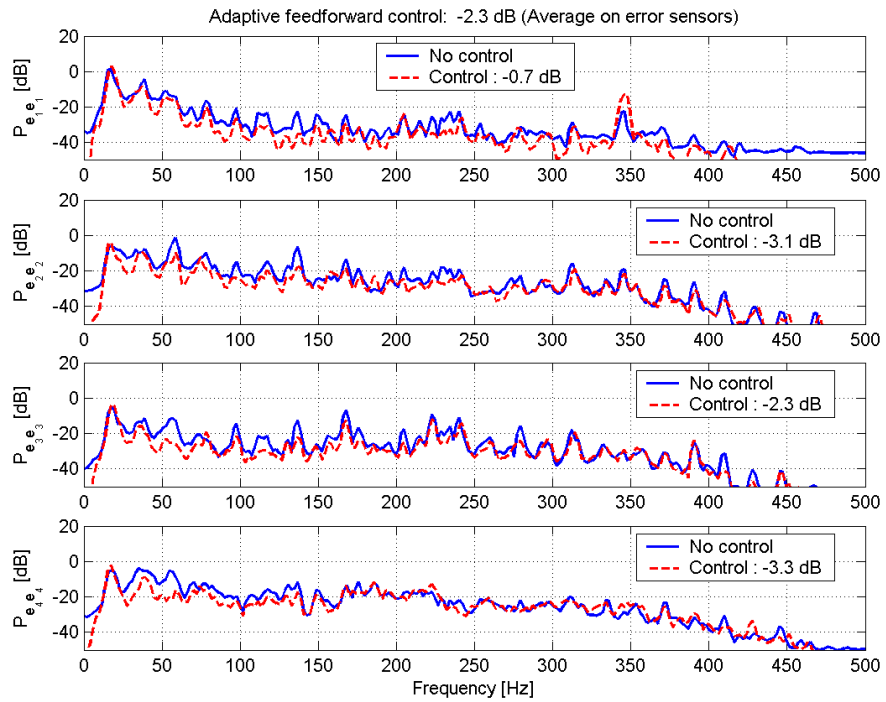
staat in de legenda rechtsboven de reductie in dB's weergegeven met ANC aan t.o.v. ANC uit.



Figuur 3.4: Gemeten geluidrukniveaus (relatief) op de foutmicrofoons bij **laag** toerental met ANC uit en aan. Van boven naar beneden respectievelijk in de stuurhut, de woonkamer, de keuken en de slaapkamer.

3.3.3 Hoog toerental

Voor het uitvoeren van het ANC experiment op hoog toerental geldt hetzelfde als bij laag toerental. Figuur 3.5 geeft een overzicht van de gemeten ongewogen geluidrukniveaus op de foutmicrofoon van 0 tot 500 Hz, vastgelegd door de ANC controller, in de verschillende verblijfruimtes bij hoog toerental. In deze figuren staat in de legenda rechtsboven de reductie in dB's weergegeven met ANC aan t.o.v. ANC uit.



Figuur 3.5: Gemeten geluiddruk niveaus (relatief) op de foutmicrofoons bij **hoog** toerental met ANC uit en aan. Van boven naar beneden respectievelijk in de stuurhut, de woonkamer, de keuken en de slaapkamer.

3.3.4 Foutmicrofoonsignalen

De geluidspectra direct door de ANC controller gemeten op de foutmicrofoon zijn in Bijlage A weergegeven.

3.3.5 ANC Radius

Om de uitdoving als functie van de afstand tot de foutmicrofoon te bepalen zijn geluidmetingen met het microfoon array (5 stuks) gepland. Doordat de ***** niet lang genoeg op een constant toerental kon blijven varen was het niet mogelijk goede metingen te verrichten.

3.3.6 Samenvattend ANC *****

De gemeten geluidniveaus met ANC uit en aan, bepaald op de ***** , staan in tabel 3.1 samengevat.

Table 3.1: Overzicht van de gemeten geluidniveaus met en zonder ANC op de ***** , bij verschillende toerentallen, in de stuurhut, de woonkamer, de keuken en de slaapkamer.

	Vrijloop		Laag toerental	Hoog toerental
	dB	dB(A)	dB	dB
Stuurhut				
ANC uit	80.0	66.3	-	-
ANC aan	75.4	65.4	-	-
Vershil	-5.6	-0.9	-2.7	-0.7
<i>ANC verschil (0-500 Hz)</i>				
Woonkamer	-5.8	-	-4.0	-3.1
Keuken	-7.5	-	-5.6	-2.3

	Vrijloop		Laag toerental	Hoog toerental
	dB	dB(A)	dB	dB
Slaapkamer	-7.3	-	-5.3	-3.3

Uit de tabel blijkt dat het ongewogen geluidniveau in de verschillende ruimten door het ANC enkele dB's afneemt. Bij vrijloop is de reductie hoger dan bij laag en hoog toerental. De reductie in dB(A), ca. 1, is zoals te voorzien was geringer doordat ANC in deze ruimte alleen in staat is geluid met frequenties < 300 Hz te reduceren.

In de figuren is te zien dat een hoog geluidniveau aanwezig is bij frequentiecomponenten die gekoppeld zijn aan het toerental van de motor. De grondtonen liggen bij ongeveer 25 Hz. Met name bij hoog toerental is te zien dat het niveau door ANC hier niet gereduceerd wordt. Om bij deze frequenties het geluidniveau te reduceren is een subwoofer nodig, die op dat moment niet voorhanden was. Deze was ook niet voorzien omdat de geluidopnamen afgespeeld in het laboratorium deze componenten niet weergaven. Indien een subwoofer aanwezig was geweest zou ook hier een reductie gerealiseerd zijn en zou de overall reductie in dB groter zijn geweest.

4 ANC test aan boord van de *****

Op 27 februari 2009 zijn er ANC experimenten en geluidmetingen uitgevoerd op het schip “*****”. Het schip lag in *****.

4.1 ANC System

Op de ***** zijn ANC experimenten uitgevoerd in de woonkamer, de keuken en de slaapkamer. In de keuken en de slaapkamer is 1 microfoon en 1 middenfrequent luidspreker opgesteld. In de woonkamer is een ANC systeem opgebouwd met 3 microfoons, 3 middenfrequent luidsprekers en 1 subwoofer. Alle drie de ruimten zijn d.m.v. het ANC systeem met elkaar verbonden. Voor het referentie signaal van het ANC systeem zijn drie versnellingsopnemers op het dak van het schip bevestigd.

Het verschil met de experimenten op de ***** is dat in de woonkamer een ANC is opgebouwd met drie microfoons, drie middenfrequent luidsprekers en daarbij ook nog een subwoofer. De subwoofer is in staat om zeer laagfrequent geluid te genereren, lager dan 30 Hz. Bij de experimenten op de ***** was duidelijk geworden dat ook zeer laagfrequent geluid in de ruimten aanwezig was. Het ANC systeem kon door het ontbreken van een subwoofer het laagfrequente geluid toen niet voldoende reduceren.

Met behulp van een microfoon array van vijf microfoons, met een onderlinge afstand van 10 cm, is het geluidniveau gemeten als functie van de afstand tot de foutmicrofoon. De array was zo opgesteld dat de eerste microfoon dichtbij de foutmicrofoon (0 cm) stond. De vijfde microfoon staat dan op een afstand van 40 cm van de foutmicrofoon. De signalen van deze microfoons zijn op de B&K PULSE analysator aangesloten zodat geluidniveaus in 1/3 octaven bepaald konden worden. Figuur 4.1 geeft een aantal foto's van de meetexperimenten op de *****.



Figuur 4.1: Fotoserie op de ***** a) Meetapparatuur aan boord, b) B&K versnellingsopnemers op het dek bevestigd, c) ANC Controller, PULSE met voorversterkers en vermogensversterker voor subwoofer

4.2 Meetprocedure en motorcondities

De volgende metingen werden uitgevoerd, vergelijkbaar aan die op de *****.

1. Motor uit (stilte) – calibratie

Bepaling van de impulsresponsies van de verblijfsruimtes en verificatie van de in het laboratorium vastgestelde afstand van de microfoons en luidsprekers.

2. Motor bij vrijloop, constant toerental

Testen van het ANC systeem, beoordeling resultaten, terug naar stap 1 indien nodig.

3. Motor bij constant middelhoog toerental

Testen van het ANC systeem, beoordeling resultaten, parameters instellen of stap 2 herhalen.

4. Motor bij constant hoog toerental

Testen van het ANC systeem, beoordeling resultaten, parameters instellen of stap 2 en 3 herhalen.

4.3 Meetresultaten

De ANC experimenten zijn uitgevoerd bij de belangrijkste motorcondities laag/vrijloop (115-rpm), middelhoog toerental (340-rpm) en hoog toerental (380-rpm) in de stuurhut, woonkamer, keuken en slaapkamer. De meetresultaten worden per toerental gepresenteerd in de vorm van ongewogen geluiddrukkniveaus in 1/3 octaafbandspectra,

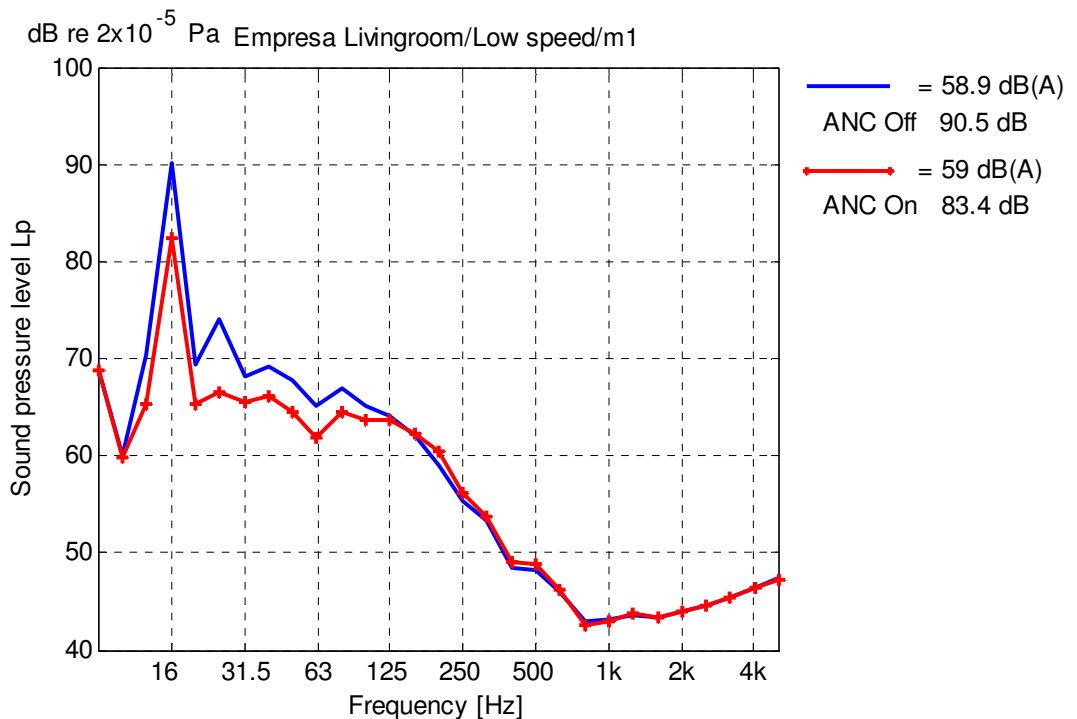
gemeten op de 1^e microfoon van het array (dichtbij de foutmicrofoon) van het ANC systeem, in iedere ruimte.

4.3.1 *Laag toerental*

Bij de experimenten op het lage toerental vrijloop lag het schip aan de kade. Bij lage toeren verschilt de dominante motorontstekingsfrequentie piek (16 Hz) enigszins van die van de ***** (23 Hz). De 16 Hz piek is minder goed waarneembaar voor het menselijk gehoor.

De Subwoofer is in staat bij deze lage frequenties geluid te reduceren. De subwoofer was echter alleen in de woonkamer aanwezig, dus zijn de reducties in de overige ruimtes minder. Aangezien de slaapkamer en de keuken op korte afstand liggen en met elkaar in verbinding staan, ontstaat wel enige reductie ten gevolge van het ANC systeem dat de drie ruimten akoestisch met elkaar koppelt.

Figuren 4.2, 4.3 en 4.4 geven de A-gewogen en ongewogen geluiddruk niveaus weer respectievelijk gemeten in de woonkamer, slaapkamer en keuken. Deze niveaus zijn gemeten met de eerste microfoon van het array die dichtbij de foutmicrofoon was opgesteld.



Figuur 4.2: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluiddruk niveaus in de woonkamer van de ***** bij laag motortoerental, met en zonder ANC.

Figuur 4.3: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluiddrukkniveaus in de slaapkamer van de ***** bij laag motortoerental, met en zonder ANC.

Figuur 4.4: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluiddrukkniveaus in de keuken van de ***** bij laag motortoerental, met en zonder ANC.

Uit de metingen blijkt dat de dominante geluidpiek (16 Hz octaafband) gegenereerd door de motorontstekingsfrequentie door ANC in de drie ruimten ongeveer 8 dB gereduceerd wordt. Het geluid van de eerste harmonische van de motorontstekingsfrequentie (25 Hz octaafband), die vooral in de woonkamer en keuken aanwezig is, wordt ook gereduceerd met ca. 8 dB.

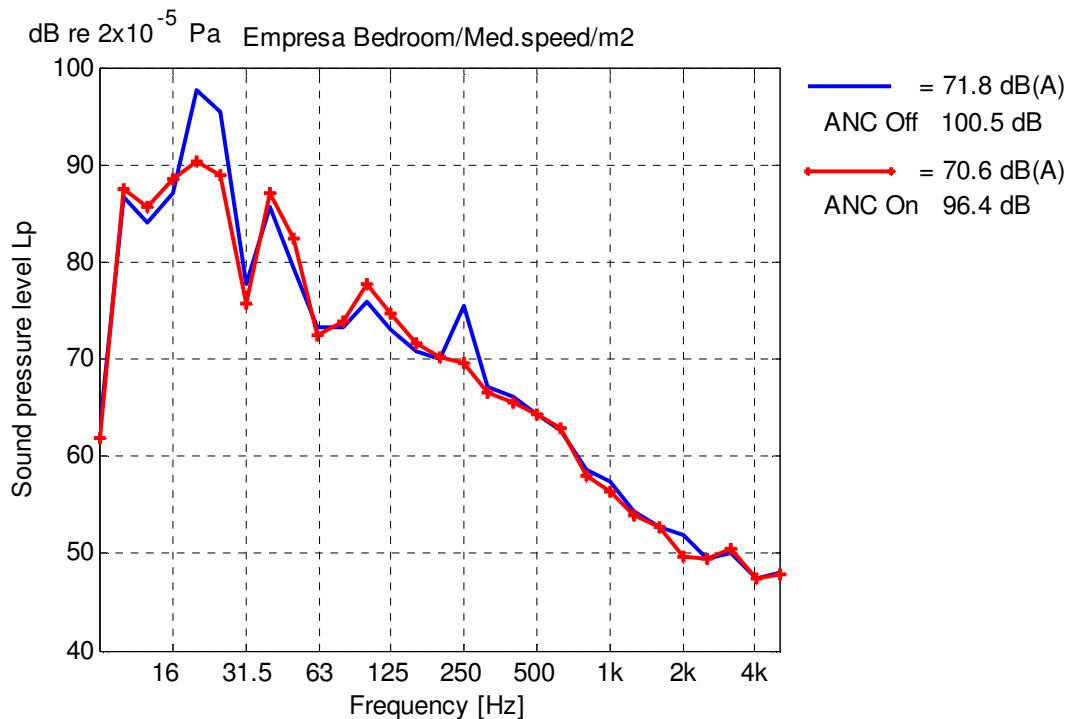
In het frequentiegebied van 31,5 Hz tot 125 Hz octaafband wordt in de woonkamer een reductie gerealiseerd van ca. 3 dB. In de slaapkamer is in dit frequentiegebied de reductie nihil en in de slaapkamer neemt het geluid niveau hier zelfs toe.

4.3.2 *Middelhoog toerental*

De experimenten bij middelhoog toerental zijn uitgevoerd tijdens varen. Bij middelhoog toerental is enig geratel hoorbaar en verschuift het geluid van de motorontstekingsfrequentie van de 16 Hz naar de 20 en 31 Hz octaafbandfrequenties. Ook hier geldt dat de niveaus bij deze lage frequenties alleen door een subwoofer gereduceerd kunnen worden.

Figuren 4.5, 4.6 en 4.7 geven de A-gewogen en ongewogen geluiddrukkniveaus weer respectievelijk gemeten in de woonkamer, slaapkamer en keuken. Deze niveaus zijn gemeten met de eerste microfoon van het array die dichtbij de foutmicrofoon was opgesteld.

Figuur 4.5: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluiddrukkniveaus in de woonkamer van de ***** bij middelhoog motortoerental, met en zonder ANC.



Figuur 4.6: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluidrukniveaus in de slaapkamer van de ***** bij middelhoog motortoerental, met en zonder ANC.

Figuur 4.7: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluidrukniveaus in de keuken van de ***** bij middelhoog motortoerental, met en zonder ANC.

Zoals in figuur 4.5 te zien is, werkt ANC in de woonkamer het beste door de aanwezigheid van de subwoofer. Daar wordt onder de 30 Hz een reductie van 6 - 8 dB bereikt en daarboven tot ca. 125 Hz een reductie van ongeveer 3 dB.

In de slaapkamer is de reductie door ANC van het geluid van de motorontstekingsfrequentie ca. 7 dB. De niveaus bij de frequenties 12 Hz en van 40 tot 125 Hz) neemt toe met ca. 1 dB,

In de keuken wordt het geluid t.g.v. de motorontstekingsfrequentie in de octaafbanden 25 en 31,5 Hz met ongeveer 9 dB gereduceerd door ANC. Vanaf de 40 Hz tot de 300 Hz octaafband neemt het geluidniveau toe met 1 tot 5 dB. De verhoging in deze octaafbanden wordt o.a. veroorzaakt door het geratel van keukengerie, deuren en andere klapperende onderdelen in de keuken. De niveaus van dit soort geluiden kunnen niet door ANC worden gereduceerd.

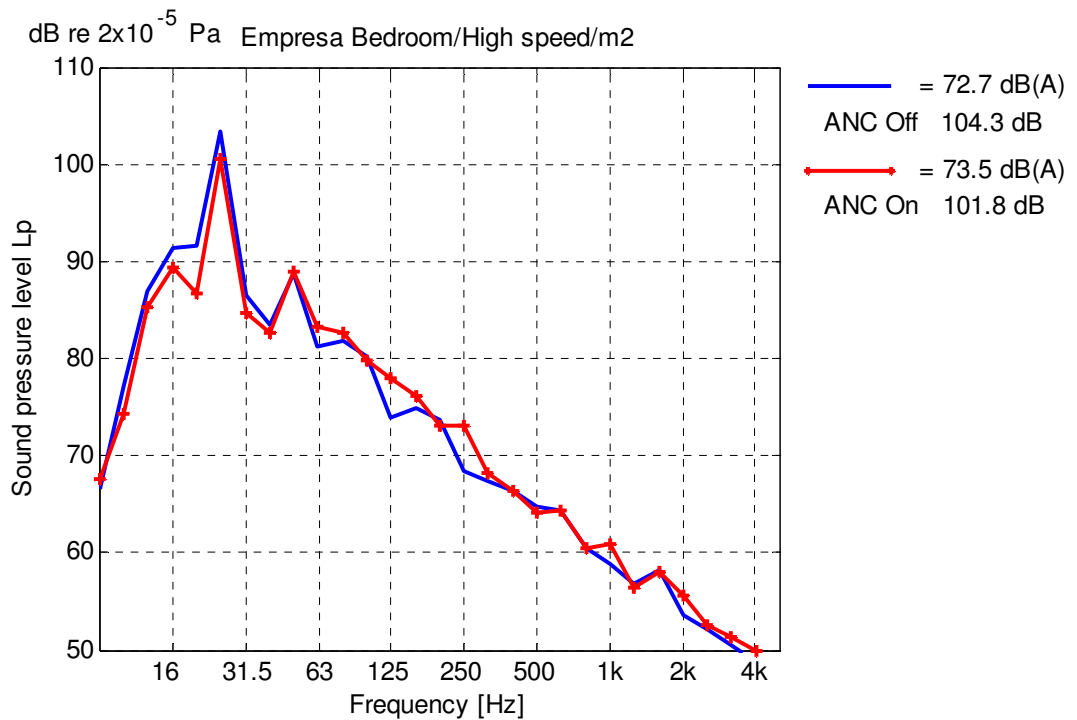
4.3.3 Hoog toerental

Tijdens dezelfde vaart zijn ANC experimenten uitgevoerd waarbij de motor op het hoge toerental loopt. Bij dit toerental wordt het motorgeluid en het geratel van meubilair en ramen vrij luid. Het geluid van de motorontstekingsfrequentie wordt nu vooral

waargenomen in de 25 Hz octaafband. Het geluid in deze octaafband kan alleen door de subwoofer gereduceerd worden.

Figuren 4.8, 4.9 en 4.10 geven de A-gewogen en ongewogen geluiddruk niveaus weer respectievelijk gemeten in de woonkamer, slaapkamer en keuken. Deze niveaus zijn gemeten met de eerste microfoon van het array die dichtbij de foutmicrofoon was opgesteld.

Figuur 4.8: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluiddruk niveaus in de woonkamer van de ***** bij hoog motortoerental, met en zonder ANC.



Figuur 4.9: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluiddruk niveaus in de slaapkamer van de ***** bij hoog motortoerental, met en zonder ANC.

Figuur 4.10: A-gewogen (boven) en ongewogen (onder) gemeten geluiddruk niveaus in de keuken van de ***** bij hoog motortoerental, met en zonder ANC.

Bij dit toerental neemt het geluid t.g.v. de motorontstekingsfrequentie, in alle drie de ruimten, toe tot niveaus van 105 dB en is nog eens ongeveer 5 dB luider dan bij

middelhoog toeren. Dit wordt door de personen die tijdens de experimenten aanboord waren als zeer hinderlijk ervaren.

In de woonkamer, waar de subwoofer staat, neemt het geluiddrukkniveau bij 20 Hz door het ANC systeem met ongeveer 13 dB af. Ongeveer even luid als tijdens het experiment waarbij de motor laag toeren loopt. In de octaafbanden van 31,5 Hz tot 125 Hz wordt het geluid slechts met ca. 1 à 2 dB gereduceerd.

Uit de figuren 4.9 en 4.10, slaapkamer en keuken, blijkt dat de geluidreductie veel minder is, ongeveer 3 dB en in de overige octaafbanden neemt niveau soms weer toe met 1dB. Hier geldt wederom dat de verhoging in deze octaafbanden o.a. wordt veroorzaakt door het geratel van keukengerei, deuren en andere klapperende onderdelen in de keuken. De niveaus van dit soort geluiden kunnen niet door ANC worden gereduceerd.

4.3.4 *Foutmicrofoonsignalen*

De spectra direct door de ANC controller bepaald op de foutmicrofoons zijn in Bijlage B weergegeven.

4.3.5 *ANC radius*

Om de uitdoving als functie van de afstand tot de foutmicrofoon te bepalen zijn geluidmetingen met het microfoon array (5 stuks) verricht. Deze metingen zijn uitgevoerd in de woonkamer tijdens het varen op laag en hoog toerental. Uit de resultaten blijkt dat:

- De reductie door ANC van het laagfrequent geluid (< 40 Hz) t.g.v. de motorontstekingsfrequentie nauwelijks afneemt op een afstand van 40 centimeter van de foutmicrofoon. Dit betekent dat rondom de foutmicrofoon er een gebied is met een diameter van minimaal een meter waar reductie d.m.v. ANC optreedt.
- Voor geluid met frequenties > 40 Hz is de gemeten reductie enkele dB's en is de uitdoving als functie van de afstand niet vast te stellen. Om dit vast te kunnen stellen moet allereerst het ANC systeem geoptimaliseerd worden voor deze frequenties. Uit ervaring en literatuur is gebleken dat het gebied waar reducties door ANC nog hoorbaar is ongeveer 0.1 * golflengte groot is. Bij 50 Hz betekent dat gebied met een diameter van 70 centimeter tot bij 500 Hz ca. 10 centimeter.

4.3.6 *Samenvattend ANC ******

De gemeten geluidniveaus met en zonder A-weging met en zonder ANC in de verschillende ruimten op de ***** staan in tabel 4.1 samengevat.

Tabel 4.1: Overzicht van de gemeten geluiddrukkniveaus met en zonder ANC op de ***** , bij laag, middelhoog en hoog motortoerental, in de woonkamer, slaapkamer en keuken.

*****	Laag toeren		Middel toeren		Hoog toeren	
	dB	dB(A)	dB	dB(A)	dB	dB(A)
Woonkamer						
ANC off	90,5	58,9	102,5	74,7	105,9	75,3
ANC on	83,4	59	97,1	74,2	95,5	74,9
<i>Vershil</i>	-7,1	+0,1	-5,4	-0,5	-10,4	-0,4
Slaapkamer						
ANC off	95,4	58,9	100,5	71,8	104,3	72,7
ANC on	87,8	59,4	96,4	70,6	101,8	73,5
<i>Vershil</i>	-7,6	+0,5	-4,1	-1,2	-2,5	+0,8

*****	Laag toeren		Middel toeren		Hoog toeren	
	dB	dB(A)	dB	dB(A)	dB	dB(A)
Keuken						
ANC off	85,5	58	103	71,3	107,6	74,5
ANC on	89,7	59,3	97,1	73,7	102,1	74,8
<i>Vershil</i>	+4,2	+1,3	-5,9	+2,4	-5,5	+0,3

Uit de tabel blijkt dat het ongewogen geluidniveau in de woonkamer, slaapkamer en keuken door ANC enkele dB's afneemt. In de woonkamer op hoog toerental zelfs met 10 dB. Hier is het geluidniveau t.g.v. de motorontstekingsfrequentie dan ook het hoogst en kan het ANC systeem met de subwoofer dat goed reduceren. Edoch in dB(A)'s neemt het niveau slechts weinig af, in een aantal gevallen neemt het zelfs wat toe.

Opvallend is dat in de bedrijfssituatie laag toerental het niveau in de keuken toeneemt. Niet alleen in dB(A) maar ook in dB's. Dit komt door de slechte geluidsisolatie tussen de woonkamer en de keuken waardoor de ANC regeling in de slaapkamer het niveau in de keuken laat toenemen. Het plaatsen van een subwoofer in de keuken had dit kunnen voorkomen.

Ook door het ontbreken van een subwoofer in de slaapkamer nemen de niveaus in de lage frequenties minder af dan daadwerkelijk mogelijk is.

Rondom de foutmicrofoon, tot een afstand van ca. 1 meter, neemt de reductie door ANC bij het laagfrequent geluid t.g.v. de motorontstekingsfrequentie nauwelijks af, de reductie blijft groot. Dit wordt gerealiseerd door 1 subwoofer en 1 microfoon in de ruimte te plaatsen. Voor geluid in de hogere frequenties geldt dat theoretisch het gebied veel kleiner is. Om hier een gebied met een omvang van ca. 1 meter te creëren is het noodzakelijk meer microfoons en luidspreker in het ANC systeem te gebruiken.

5 ANC en passieve maatregelen

Uit de spectra van de ANC reducties bij beide schepen is te concluderen dat ANC reducties in het laagfrequent gebied tot ca. 300 Hz mogelijk zijn in de orde van 5 tot 10 dB. In het gebied van 300 Hz tot 4 kHz moeten dan passieve maatregelen worden toegepast om het dB(A)-niveau te reduceren.

Om dit te bereiken, kan aan de volgende maatregelen gedacht worden:

- vermindering van ratelgeluiden in meubilair en ramen;
- verhoging van de absorptie in de verblijfruimtes;
- toevoeging van demping in ongedempte delen van de constructie;
- toevoeging van isolatie op sommige kritische plaatsen in het schip;
- op enkele plaatsen onderbreken van contactgeluidpaden.

Was er in het rapport van JVS nog sprake van passieve maatregelen vanaf 50 Hz, die over het algemeen duur en veel ruimte kosten, dan is dat indien ANC wordt toegepast niet meer nodig. De duurdere maatregelen zoals een verende motoropstelling of zwevende vloeren zijn dan te vermijden.

De verwachting is, dat een reductie van ca. 5-10 dB(A) mogelijk moet zijn indien een combinatie van ANC en passieve maatregelen wordt toegepast.

Het optimalisering van actieve en passieve maatregelen behoorde niet tot de scope van deze opdracht, maar lijkt uitvoerbaar.

Als de combinatie ANC en passieve maatregelen wordt toegepast is ook een verhoging in het comfortniveau te verwachten.

Als voorbeeld van het effect van toevoeging van passieve maatregelen in combinatie met ANC wordt in de figuren 5.1 en 5.2 getoond wat het effect in dB(A) is als van 250-2000 Hz een passieve reductie van 5-10 dB wordt aangenomen. Het dB(A)-niveau daalt met 5 dB(A) bij de ***** (woonkamer, laag toerental) en 3,6 dB(A) bij de ***** (woonkamer, middelhoog toerental).

Duidelijk is dat zowel voor ANC als voor passieve maatregelen een verdere optimalisatieslag nodig is, specifiek gericht op de relevante frequentiegebieden.

Figuur 5.1: A-gewogen effect van ANC met passieve maatregelen (P+), voor de ***** , woonkamer, bij laag toerental.

Figuur 5.2: A-gewogen effect van ANC met passieve maatregelen (P+), voor de ***** , woonkamer, bij middelhoog toerental.

6 Conclusies en aanbevelingen

Toepassing van antigeluid op twee binnenvaartschepen heeft aangetoond dat reducties in het dB(A)-niveau mogelijk zijn als het frequentiegebied onder 250 Hz significant bijdraagt. Met name bij de hinderlijke lage tonen, < 40, van de motorontstekingsfrequentie zijn grote reducties tot 10 dB mogelijk.

De lage bromtonen onder de 40 Hz zijn goed te reduceren met behulp van subwoofers in iedere verblijfsruimte. Dit leidt niet tot reductie van het dB(A)-niveau, maar geeft wel een sterke verbetering van het comfort. Hiervoor zijn relatief weinig microfoons en luidsprekers nodig, 1 per ruimte.

Tussen 50-250 Hz worden reducties van beperkte omvang bereikt, daarom dient de microfoon zo dicht mogelijk bij het doelgebied (de persoon in de ruimte) te worden geïnstalleerd. In dit frequentiegebied zijn meer microfoons en middenfrequent luidsprekers per kamer nodig, bijvoorbeeld 2 of 3.

Uit de resultaten blijkt dat in ieder geval ook passieve maatregelen nodig zijn om een significante reductie in het dB(A)-niveau te bereiken. Verwacht wordt dat de combinatie van antigeluid en beperkte passieve maatregelen tot een reductie van 5 dB(A) kan leiden. Vermoed wordt dat met name bij hogere toerentallen, zaken als vermindering van ratelgeluid verder zou helpen het dB(A)-niveau te verlagen.

Een optimale configuratie van een ANC systeem op een schip kan bestaan uit:

- een centraal opgestelde ANC controller voor alle ruimten;
- 2-3 (goedkope) microfoons per ruimte;
- 2 tot 3 middenfrequent luidsprekers per ruimte;
- 1 subwoofer per ruimte.

Om aan de geluidniveaus te kunnen voldoen, zoals opgesteld in de richtlijn door de Centrale Commissie voor de Rijnvaart, is het alleen toepassen van ANC niet voldoende. ANC levert een reductie op in het laagfrequente gebied van het geluid waardoor minder ingrijpende passieve maatregelen waarschijnlijk nodig zijn. Ook de combinatie ANC en eenvoudige passieve maatregelen zal in een aantal gevallen niet het gewenste resultaat opleveren, gezien de zeer hoge gemeten geluidniveaus zoals in het JVS rapport worden gepresenteerd. Hier blijkt dat in sommige ruimten reducties van ca. 15 dB(A) noodzakelijk zijn om aan de gestelde eisen te kunnen voldoen.

Gezien de beperkte ruimte, voor het nemen van akoestische maatregelen, en het grote verschil in geluidniveaus op deze oude schepen is een uitgebalanceerde combinatie van ANC en passieve maatregelen noodzakelijk. Dit zal slechts in een aantal gevallen leiden tot de gewenste reducties.

7 Literatuur

J.K. Florijn, Trilling/geluid onderzoek, JVS rapport 95151, d.d. 3 juli 1995.

8 Ondertekening

Delft, 9 April 2009

TNO Industrie en Techniek

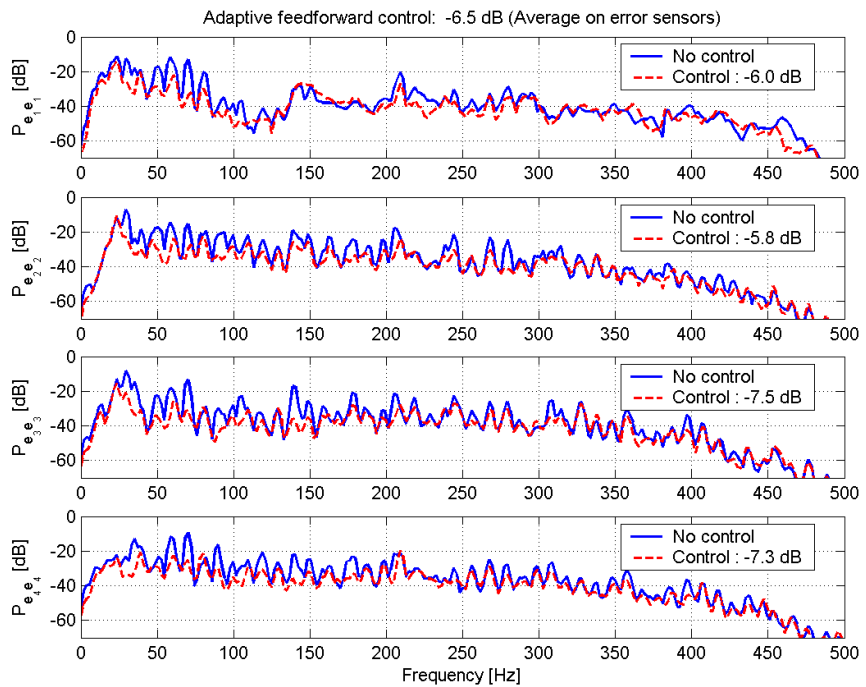
Ing. P. Hendriksen
Afdelingshoofd

Dr. ir. A.P. Berkhoff
Auteur

A ANC Controller Data *****

Deze bijlage geeft een overzicht van de geluidrukniveaus (smalbandig) op de foutmicrofoons zoals door het ANC systeem zijn vastgelegd op de *****. De signalen op deze microfoons zijn de signalen waarmee het ANC systeem de te reduceren niveaus beoordeelt het antigeluid berekent en vervolgens naar de luidspreker(s) stuurt.

De figuren 1a t/m 3a geven respectievelijk de geregistreerde geluidrukniveaus weer bij vrijloop aan de kade, middelhoog en hoog toeren tijdens het varen met ANC uit (blauw) en aan (rood). In de figuren staat langs de x-as de frequentie (Hz) en langs de y-as (relatieve) geluidrukniveaus weergegeven. In het kader rechts boven staat in rood aangegeven, de totale gerealiseerde geluidreductie over het frequentiegebied van 0 tot 500 Hz op de foutmicrofoon in dB, ongewogen.



Figuur 1a: Gemeten geluidrukniveaus (relatief) op de foutmicrofoons bij **vrijloop** met ANC uit en aan. Van boven naar beneden respectievelijk in de stuurhut, de woonkamer, de keuken en de slaapkamer.

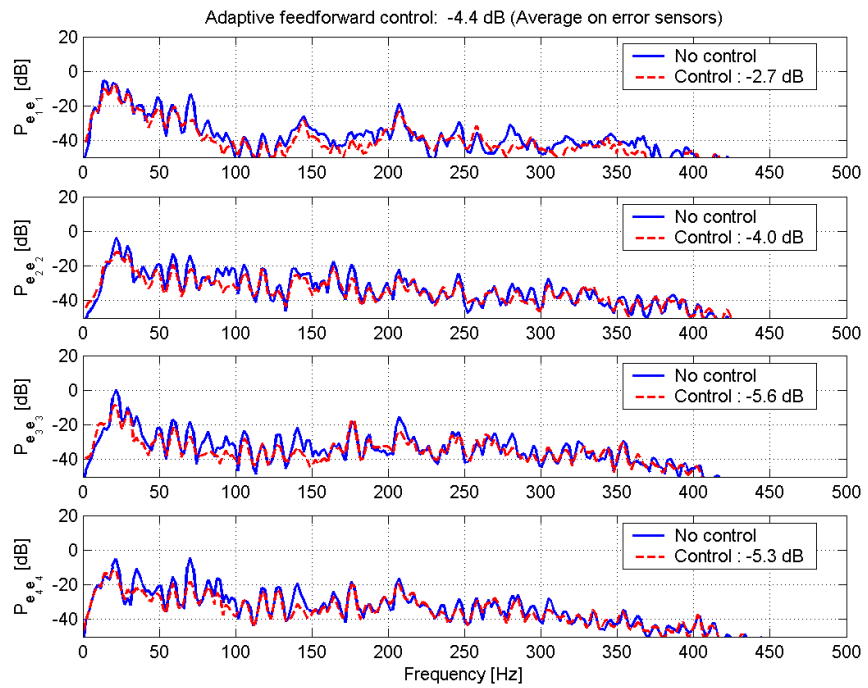
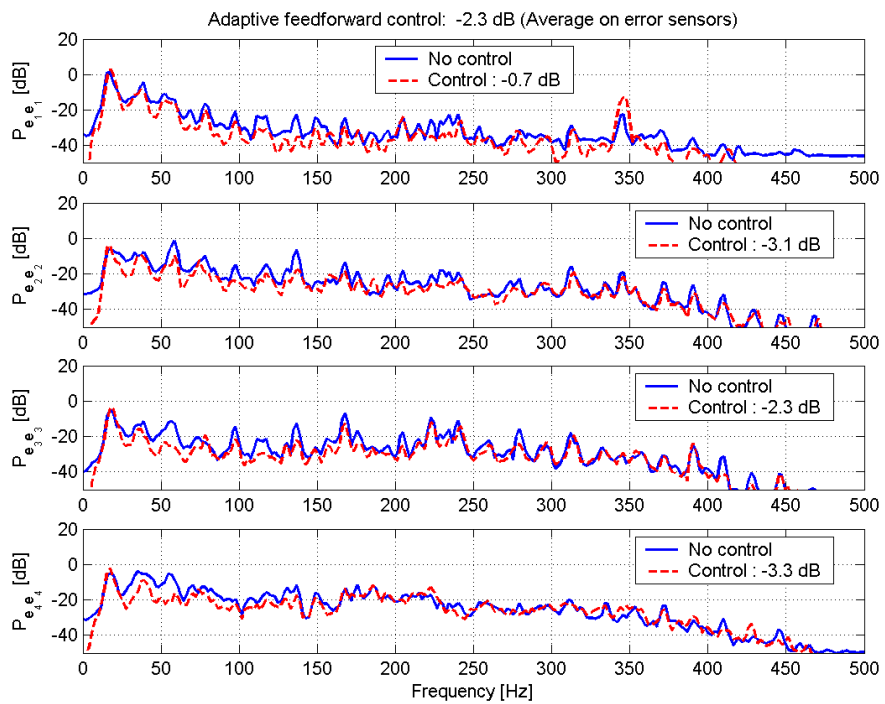


Figure 2a: Gemeten geluidrukniveaus (relatief) op de foutmicrofoons bij **laag** toerental met ANC uit en aan. Van boven naar beneden respectievelijk in de stuurhut, de woonkamer, de keuken en de slaapkamer.

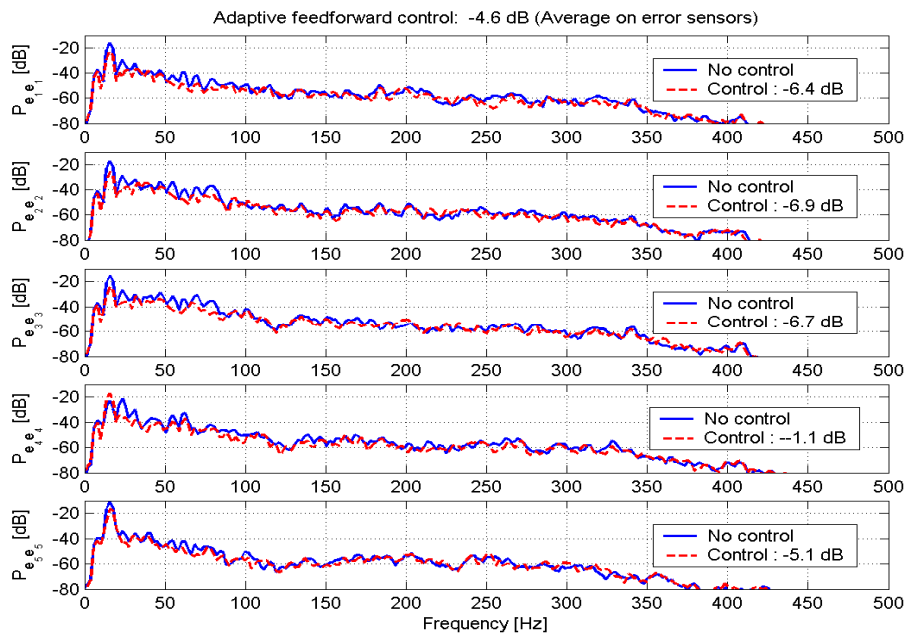


Figuur 3a: Gemeten geluidrukniveaus (relatief) op de foutmicrofoons bij **hoog** toerental met ANC uit en aan. Van boven naar beneden respectievelijk in de stuurhut, de woonkamer, de keuken en de slaapkamer.

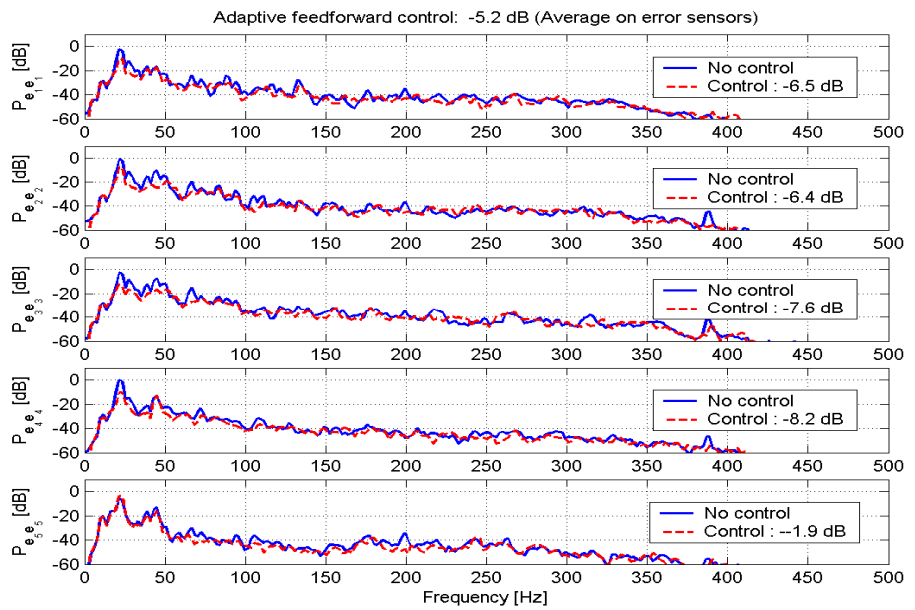
B ANC Controller Data *****

Deze bijlage geeft een overzicht van de geluidrukniveaus (smalbandig) op de foutmicrofoons zoals door het ANC systeem zijn vastgelegd op de *****. De signalen op deze microfoons zijn de signalen waarmee het ANC systeem de te reduceren niveaus beoordeelt het antigeluid berekent en vervolgens naar de luidspreker(s) stuurt.

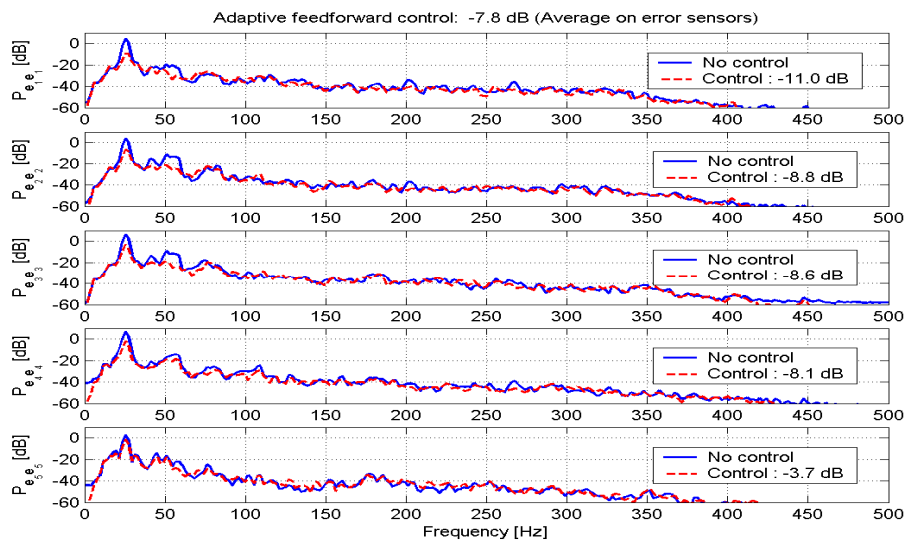
De figuren 1b t/m 3b geven respectievelijk de geregistreerde geluidrukniveaus weer bij vrijloop aan de kade, middelhoog en hoog toeren tijdens het varen met ANC uit (blauw) en aan (rood). In de figuren staat langs de x-as de frequentie (Hz) en langs de y-as (relatieve) geluidrukniveaus weergegeven. In het kader rechts boven staat in rood aangegeven, de totale gerealiseerde geluidreductie over het frequentiegebied van 0 tot 500 Hz op de foutmicrofoon in dB, ongewogen.



Figuur 1b: Gemeten geluidrukniveaus (relatief) op de foutmicrofoon bij laag toerental (115 rpm) met ANC uit en aan. De drie bovenste figuren geven de niveaus op de 3 microfoons in de woonkamer het 4^e figuur op de microfoon in de keuken en het onderste figuur op de microfoon in de slaapkamer.



Figuur 2b: Gemeten geluiddrukniveaus (relatief) op de foutmicrofoon bij **middelhoog** toerental (340 rpm) met ANC uit en aan. De drie bovenste figuren geven de niveaus op de 3 microfoons in de woonkamer het 4^e figuur op de microfoon in de keuken en het onderste figuur op de microfoon in de slaapkamer.



Figuur 3b: Gemeten geluiddrukniveaus (relatief) op de foutmicrofoon bij **hoog** toerental (380 rpm) met ANC uit en aan. De drie bovenste figuren geven de niveaus op de 3 microfoons in de woonkamer het 4^e figuur op de microfoon in de keuken en het onderste figuur op de microfoon in de slaapkamer.