

## Actieve geluidsonderdrukking in gehoorbeschermers

Jan A. Verhave, Herman J.M. Steeneken en Sander J. van Wijngaarden  
TNO Technische Menskunde, Postbus 23, 3769ZG Soesterberg, Nederland  
Emailadressen: {verhave, steeneken, vanwijngaarden}@tm.tno.nl

### Active Noise Reduction in hearing protectors

#### Abstract

Active Noise Reduction (ANR) as a method to enhance the performance of hearing protectors has already been used for many years. ANR is based on the principle of 'anti-noise': by recording undesired noises, and reproducing these in anti-phase with the original signal, the original noise is partly extinguished. The techniques applied in commercially available systems is often relatively simple. By applying straight-forward (analogue) designs, a certain additional sound attenuation can be obtained within a limited frequency range (typically 50-1000 Hz). The additional sound attenuation, which adds up to the passive attenuation of the hearing protector itself, is typically around 20 dB. The performance of analogue ANR systems is the result of a design compromise: when the active sound attenuation is increased, the system will become more inclined to show undesirable behavior (instability, oscillations). This usually becomes apparent in the form of unwanted feedback noises. With the aid of digital techniques, the performance of ANR systems can be further improved. By continuously monitoring the stability of the system, it can be continuously adjusted to the maximum attainable sound attenuation. Whenever the systems is inclined to become unstable, the active noise reduction is reduced until the system is fully stable again. Another possibility of digital systems is to introduce adaptive algorithms that minimize sound exposure and maximize speech intelligibility.

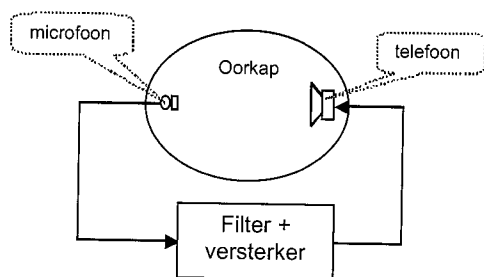
#### 1. Inleiding

Onder lawaaiige omstandigheden is het gebruik van gehoorbeschermers in veel gevallen noodzakelijk. In sommige situaties, zoals in bepaalde militaire voertuigen, is de gehoorbescherming die kan worden bereikt met conventionele gehoorbeschermers onvoldoende. Eén van de methoden om de geluidverzwakking van een gehoorbeschermers te verbeteren is het toepassen van actieve geluidsonderdrukking, meestal aangeduid met de Engelstalige term *Active Noise Reduction* (ANR).

ANR is gebaseerd op het principe van 'anti-geluid': door het ongewenste geluid (lawaai) te registreren en in tegenfase weer te geven, doven het oorspronkelijke geluid en dit 'anti-geluid' elkaar gedeeltelijk uit. Met uitzondering van zeer kunstmatige signalen (zoals zuivere sinustonen) is het niet mogelijk om het ongewenste geluid volledig uit te doven; in de praktijk zal ANR slechts een gedeelte van het lawaai kunnen wegnemen. Door allerlei theoretische en praktische beperkingen is ANR slechts effectief bij relatief lage frequenties (meestal <1000 Hz).

#### 2. Principe van Active Noise Reduction (ANR)

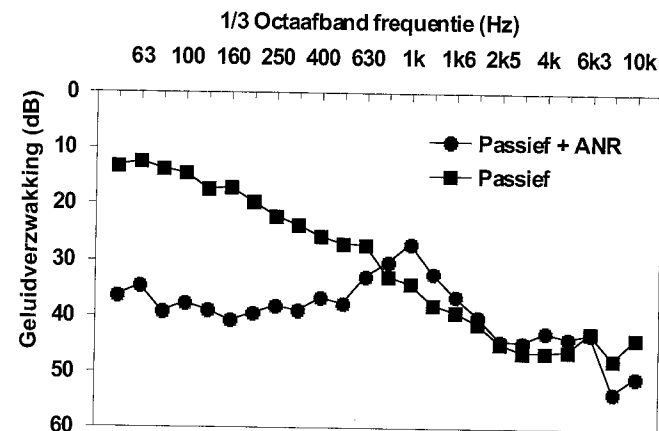
Er bestaan diverse vormen van actieve geluidsonderdrukking. De vorm die meestal wordt toegepast in gehoorbeschermers staat bekend als *feedback ANR*. In figuur 1 wordt een schematische weergave van een oorkap met ANR gegeven.



Figuur 1: Schematische weergave van oorkap met ANR.

In de oorkap bevinden zich een telefoon (telefooncapsule, luidsprekertje) en een microfoon. De microfoon registreert het ongewenste geluid, dat versterkt en in tegenfase (inverteren) wordt weergegeven door de telefoon. Het resultaat is dat onder de oorkap het ongewenste lawaai wordt uitgedoofd. Echter, de fase-frequentiekarakteristiek die bij de keten van figuur 1 hoort is in de praktijk nooit volledig vlak. Het inverteren van het microfoonsignaal in de versterker, hetgeen neerkomt op het verdraaien van de fase met 180 graden, levert daardoor onder de oorkap niet bij alle frequenties een signaal op dat precies in tegenfase is met het oorspronkelijke lawaai. Sterker nog: bij sommige frequenties zal in plaats van tegenkoppeling mee-koppeling optreden. Hierdoor kan het systeem zelfs instabiel worden. Om dit te voorkomen wordt een filter in de 'lus' opgenomen. Dit filter laat uitsluitend frequenties door waarvoor de fase-frequentiekarakteristiek voldoende vlak is. Het filter is een belangrijk onderdeel van het ANR-systeem. Het is tijdens het ontwerp afgestemd op de elektroakoestische eigenschappen van de telefoon-microfooncombinatie in de oorkap.

In figuur 2 is de geluidverzwakking als functie van de frequentie van een gehoorbeschermer met ANR gegeven. De afzonderlijke lijnen geven respectievelijk de passieve verzwakking van de gehoorbeschermer (ANR-systeem uitgeschakeld, vierkante symbolen) en de totale geluidverzwakking weer (ANR systeem ingeschakeld, ronde symbolen). Het verschil tussen beide lijnen is het "ANR-effect": de actieve bijdrage aan de totale geluidverzwakking.



Figuur 2: Geluidverzwakking van een gehoorbeschermer (passief) met ANR.

In figuur 2 is duidelijk te zien dat feedback-ANR in de gehoorbeschermer voornamelijk effectief is voor lage frequenties. De bijdrage tot de geluidverzwakking kan dan oplopen tot 20 dB. Voor het frequentiegebied rond 1kHz vindt echter enige versterking van het lawaai onder de oorkap plaats. Dit is het gevolg van meekoppeling door het ANR-systeem. Vrijwel alle commercieel verkrijgbare ANR-oorkappen vertonen verzwakkingcurven zoals in figuur 2. Slechts het frequentiegebied waarin ANR effectief is, en de mate waarin, verschilt enigszins van systeem tot systeem – hetzelfde geldt voor het 'negatieve ANR-effect' rond 1 kHz.

De geluidverzwakking is niet de enige 'kwaliteitsmaat' voor een ANR-systeem. De stabiliteit van het systeem is minstens zo belangrijk. De instellingen van de versterker en het filter in het schema van figuur 1 bepalen zowel de "actieve" geluidverzwakking als de stabiliteit. Vergroten van het totale ANR-effect, door een grotere versterkingsfactor te kiezen, zal ertoe leiden dat het systeem sneller zal neigen tot instabiliteit. Het veroorzaakt dan ongewenste geluiden. De ongewenste versterkte terugkoppeling treedt op aan de randen van het frequentiegebied waar ANR effectief is. Als de instabiliteit optreedt aan de laagfrequente kant van dit gebied, dan worden de ongewenste geluiden wel omschreven als 'rommelen' of 'zuchten'. Treedt de ongewenste terugkoppeling op aan de hoogfrequente kant, dan omschrijft men dit meestal als 'piepen' of 'rondzingen'. Een instabiel ANR-systeem kan de werking als gehoorbeschermer geheel teniet doen en zelfs een hogere lawaai-belasting en verminderde spraakverstaanbaarheid tot gevolg hebben.

De ontwerper van een ANR-systeem moet dus een compromis sluiten: naarmate het systeem kritischer wordt afgesteld, treedt eerder instabiliteit op, maar is het ANR-effect groter. In de praktijk wordt een zeker veiligheidsmarge aangehouden ten opzichte van het punt waarop het systeem instabiel wordt. Door deze veiligheidsmarge hebben veranderende akoestische omstandigheden, bijvoorbeeld het op en afzetten van de gehoorbeschermer, geen invloed op de stabiliteit van het ANR-systeem tot gevolg. Wel zal bij een lager ingestelde versterking de geluidverzwakking voor de lage frequenties minder zijn.

### 3. Toepassingen van ANR

#### 3.1 Gehoorbescherming

Doordat ANR met name effectief is voor lage frequenties, vindt het vooral toepassing als gehoorbeschermer in de omgeving van laagfrequente lawaaibronnen. In deze categorie vallen onder meer zware machines, voer- en vaartuigen met dieselmotoren en helikopters. Tegen lawaaibronnen die in hun spectrum een piek vertonen rond 1 kHz is ANR zelden effectief, doordat het negatieve ANR-effect bij deze frequentie de positieve effecten al gauw tenietdoet.

Voor vele toepassingen is het zinvol om op voorhand te weten of ANR als aanvulling op de gehoorbescherming kan worden toegepast. De mate waarin een oorkap met ANR gehoorbescherming biedt in lawaai wordt meestal uitgedrukt in het A-gewogen geluidniveau onder de oorkap. Aan de hand van de geluidverzwakking van de gehoorbeschermer en het lawaaispectrum waarin de gehoorbeschermer zal worden toegepast, kan het A-gewogen lawaainiveau onder de gehoorbeschermer voorspeld. Aanvulling door ANR mag natuurlijk geen verhoging van het A-gewogen lawaainiveau (bijvoorbeeld ten gevolge van meekoppeling) onder de gehoorbeschermer tot gevolg hebben.

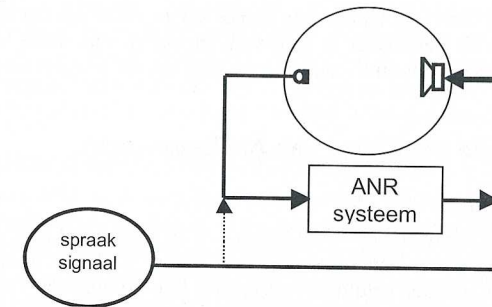
Zelfs in sommige situaties waar het lawaaispectrum aanleiding geeft tot het toepassen van ANR, blijken de huidige commerciële ANR-systemen niet goed toepasbaar. De reden is dan meestal dat ANR-systemen door omstandigheden instabiel worden. Een voorbeeld van situaties waar het toepassen van ANR in de praktijk soms problematisch is, is in bepaalde typen helikopters.

In het vorige hoofdstuk werd al aangegeven dat er afwijkingen zijn van een ideale vlakke frequentie-overdracht. Deze afwijkingen zijn ongunstig voor de werking van het ANR-systeem. Dergelijke afwijkingen (sterke lokale fase-draaiingen) treft men typisch aan rond de kantelpunten van de transducers. Rond deze frequenties treedt gemakkelijk ongewenste meekoppeling op. In helikopters levert met name het laagfrequente kantelpunt van de microfoon soms problemen op. De rotors van helikopters leveren zeer sterke (subsonische) frequentiecomponenten op, die in de praktijk sterke invloed hebben op de werking van ANR. De laagfrequente trillingen hebben vaak ook hoge drukvariaties nabij de microfoon van het ANR-systeem als resultaat. De elektronica is hier meestal niet op gedimensioneerd. Het gevolg is dat versterkers vervormen en het ANR-systeem zich a-lineair gaat gedragen. Het resultaat dan is vaak een toename van het lawaainiveau onder de kap.

#### 3.2 Spraakverstaanbaarheid

Naast aanvulling op de gehoorbescherming kan een ANR-systeem de verstaanbaarheid van de spraakcommunicatie in positieve zin beïnvloeden. In veel situaties waar ANR wordt toegepast, wordt de spraakcommunicatie via de telefoons in de oorkap weergegeven. Hierbij kan men in het militaire domein bijvoorbeeld denken aan headsets en helmen die door piloten of tankbemanningen worden gedragen. Voor deze beroepsgroep is verstaanbaarheid van essentieel belang. Toepassen van een ANR systeem met als doel de gehoorbescherming te verbeteren mag niet als resultaat hebben dat de verstaanbaarheid van de spraakcommunicatie afneemt. Bij een slecht ontworpen ANR-systeem zal dit wel het geval zijn. Immers, alle geluiden onder oorkap zullen door het ANR-systeem beïnvloed worden, dus ook de spraak die door de headset zelf wordt weergegeven. Het resultaat is dan een ongewenst kleuring van het spraaksignaal doordat lage frequenties zullen worden onderdrukt. Onderdrukking van het spraaksignaal door het ANR-systeem kan worden voorkomen. Figuur 3 geeft het

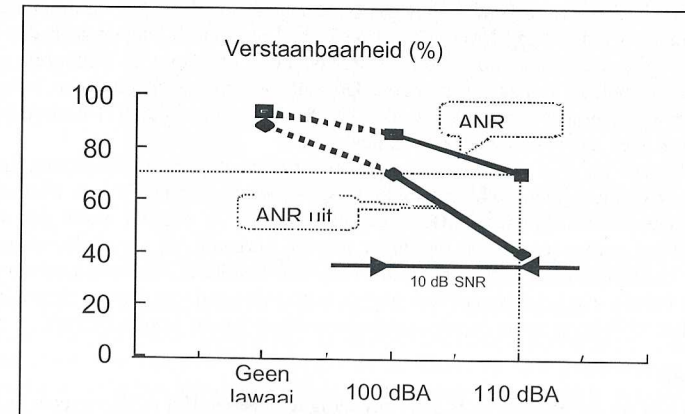
principeschema om het spraaksignaal te behandelen zodat het niet door het ANR-systeem wordt onderdrukt.



Figuur 3: Spraakcommunicatie in combinatie met een ANR-systeem.

Het spraaksignaal wordt onder de oorkap door de telefoon weergegeven. Het spraaksignaal wordt dan ook door de microfoon van het ANR-systeem geregistreerd. Dit resulteert in een onderdrukking van de lage frequenties door het ANR-systeem. Door het spraaksignaal van het microfoonsignaal af te trekken (de gestippelde lijn), wordt voorkomen dat het spraaksignaal door het ANR-systeem wordt onderdrukt.

In figuur 4 is de verstaanbaarheid van spraakcommunicatie onder de oorkap (gemeten volgens de *Speech Transmission Index* (STI) methode) gegeven als functie van het omgevingslawaainiveau (laagfrequente lawaaibron). In de figuur zijn resultaten gegeven met een ingeschakeld en uitgeschakeld ANR-systeem. Duidelijk is te zien dat in laagfrequente ruis een hogere verstaanbaarheid van de spraakcommunicatie wordt verkregen met een ingeschakeld ANR-systeem. De winst in verstaanbaarheid is ook uit te drukken in een verbetering van de signaal-ruis verhouding. Gegeven een verstaanbaarheidspercentage (bijv. 70 %) kan via de snijpunten met beide curven het bijbehorende lawaainiveau worden opgezocht. Het verschil tussen deze lawaainiveaus levert de verbetering in signaal-ruis verhouding voor de spraakcommunicatie. Met andere woorden: in combinatie met ANR kunnen we dezelfde verstaanbaarheid verkrijgen in een 10 dB hoger lawaainiveau dan zonder ANR.



Figuur 4: Verstaanbaarheid van de spraakcommunicatie met een ANR-systeem in laagfrequent lawaai.

### 3.3 Comfort

De meeste toepassingen van ANR zijn gericht op het terugdringen van het omgevingslawaai om de lawaaidosis van de gebruikers te beperken. In toenemende mate wordt ANR ook toegepast bij minder extreme lawaainiveaus, met als doel om het comfort van de gebruiker te verhogen.

## 4. Het meten van de prestaties van ANR-systemen

### 4.1 Geluidverzwakking

Het meten van de geluidverzwakking van ANR-systemen komt altijd neer op het uitvoeren van een verschilmeting, tussen een situatie met en zonder ANR. Er wordt allereerst een breedbandig, homogeen, diffuus geluidveld gecreëerd. Een proefpersoon neemt vervolgens plaats in het geluidveld. Nabij de gehoorgang van de proefpersoon zijn miniatuur-microfoontjes geplaatst. Via de microfoons worden de volgende drie spectra van het geluid nabij de gehoorgang bepaald:

1. zonder gehoorbeschermer
2. met gehoorbeschermer
3. met gehoorbeschermer en ingeschakelde ANR

Uit de verschilmetingen 2 en 3 is de bijdrage van het ANR systeem tot de geluidverzwakking te bepalen. De verschilmetingen 1 en 3 leveren de bijdrage van het totale systeem (gehoorbeschermer + ANR) tot de geluidverzwakking. In figuur 2 zijn resultaten van deze verschilmetingen weergegeven. Dit type metingen worden ook MIRE-metingen (*Microphone In Real Ear*) genoemd. Voor het bepalen van de werking van een ANR-systeem in hoge lawaainiveaus (bijvoorbeeld in knallen) wordt om veiligheidsredenen veelal gebruik gemaakt van een kunsthoofd.

### 4.2 Spraakverstaanbaarheid

De spraakverstaanbaarheid kan met vele methoden worden bepaald (zoals de *Consonant-Vowel-Consonant* ofwel CVCmethode, en de *Speech Reception Threshold*, ofwel SRT-methode). Het meest efficiënt is een methode die snel en objectief een maat voor de verstaanbaarheid geeft. De STI-methode (*Speech Transmission Index*) is een methode die gebruik maakt van een testsignaal. Het testsignaal is ca. 15 seconden lang en geeft dus direct een maat voor de verstaanbaarheid. Het testsignaal heeft spectrale en temporele eigenschappen die we ook in spraak terugvinden. De mate waarin de spectrale en temporele informatie verloren gaat kan worden vertaald in een STI-waarde. Via de STI-waarde kunnen we een relatie leggen met andere verstaanbaarheidsmaten.

Ook bij dit type metingen maken we bij voorkeur gebruik van proefpersonen die zijn geplaatst in een diffuus geluidsveld (zie metingen geluidverzwakking). Via de telefoon van het ANR-systeem wordt dan testsignaal weergegeven. Het testsignaal wordt dan via de MIRE-microfoon geregistreerd. De metingen worden herhaald bij verschillende geluidsniveaus van het omgevingslawaai. In figuur 4 zijn de resultaten van verstaanbaarheidsmetingen als functie van het lawaainiveau gegeven. Aan de hand van deze metingen kan de invloed van het ANR-systeem op de spraakcommunicatie in lawaai worden bepaald.

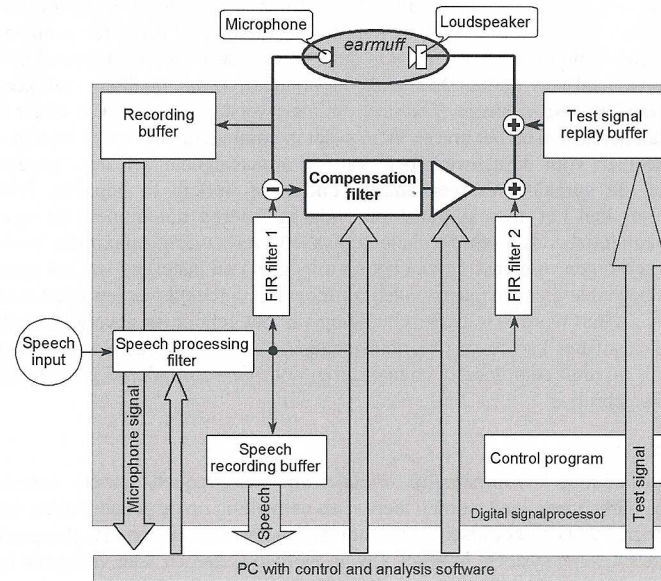
### 4.3 Stabiliteit

De stabiliteit van een ANR-systeem is niet eenvoudig te bepalen. Het ANR-systeem in figuur 2 heeft rond de 1 kHz al een zekere mate van meekoppeling. Als bijvoorbeeld de lusversterking door elektrische of akoestische omstandigheden toeneemt kan dit ANR-

systeem instabiel worden. Het systeem gaat dan hoorbaar rondzingen of fluiten (oscillatie). Om instabiliteit te voorkomen wordt voor de versterking van het ANR-systeem een zekere marge tot het oscillatiecriterium aangehouden. In de praktijk wordt de versterking van het ANR-systeem verhoogd totdat het systeem instabiel wordt. Vervolgens wordt de versterking ca. 6 dB teruggeregeld. Een marge van 6 dB is doorgaans voldoende om te compenseren voor electro-akoestische variaties en een effectief werkend ANR-systeem te realiseren.

## 5. Het adaptieve digitale TNO-TM ANR systeem

Bij toepassing van ANR in de praktijk is er nauwelijks controle of een systeem voldoende effectief is. De mate van gehoorbescherming, verstaanbaarheid en stabiliteit zijn vaak vooraf vastgelegd. Wisselende akoestische omstandigheden kunnen een negatief effect hebben op de werking van een ANR-systeem. Hierbij denken we aan fluctuerende of wisselende lawaaispectra, lawaainiveaus, slecht passende gehoorbeschermers (akoestische lekkage) enz. Het is dan ook gewenst om in praktische omstandigheden de effectiviteit van het ANR-systeem te kunnen bepalen. Standaard analoge ANR-systemen zijn daar niet op toegerust. Om deze functionaliteit aan het klassieke feedback ANR-systeem toe te voegen, is het standaardontwerp aangevuld met een DSP (*Digitale Signaal Processor*). De software in de DSP kan de werking van het ANR-systeem volgen en indien nodig, bijregelen. In figuur 5 is een schematische weergave gegeven van het TNO-TM adaptieve digitale ANR-systeem.



Figuur 5: Schematische weergave van het TNO-TM adaptieve digitale ANR-systeem.

Bovenaan in figuur 5 is de oorkap met telefoon en microfoon weergegeven. Het microfoon-signaal wordt door een DSP bewerkt (grijze blokken) en in tegenfase door de telefoon weergegeven. Voor wat betreft de onderliggende principes verschilt dit systeem niet van de analoge variant van het feedback ANR-systeem. Het systeem biedt echter wel meer mogelijkheden. Zo biedt de DSP de mogelijkheid verschillende filterkarakteristieken toe te passen.

Door gebruik te maken van verschillende filterkarakteristieken kan geluidonderdrukking voor een specifiek frequentiegebied worden verkregen. Ook de mate van actieve geluid onderdrukking kan worden ingesteld door de lusversterking bij te regelen. Dit kan van nut zijn voor die situaties waarbij ANR-effect ongewenst is. De lusversterking kan worden bijgeregeld voor een zo laag mogelijk A-gewogen geluidniveau onder de oorkap. Met het oog op stabiliteit zijn echter niet alle versterkingwaarden instelbaar.

De stabiliteit van het ANR-systeem wordt bewaakt door testsignalen in het ANR-systeem te injecteren. Deze testsignalen zijn bij voorkeur onhoorbaar (onderdrempelig). In het digitale ANR-systeem van TNO-TM wordt van een pulsvormig signaal gebruik gemaakt. Vervolgens wordt de respons van het ANR-systeem op het pulsvormige signaal bepaald (gemiddeld over een groot aantal zachte pulsen). De snelheid waarin de pulsrespons in de tijd afneemt geeft de stabiliteit van het systeem weer. Hoe sneller de pulsrespons afneemt, hoe stabiel het systeem zal zijn. Heeft het systeem de neiging instabiel te worden, dan wordt de lusversterking bijgeregeld. Omdat de stabiliteit nu continu wordt bepaald is het systeem beter bestand tegen wisselende akoestische omstandigheden.

Door middel van de DSP kan ook het spraaksignaal via de telefoon in een optimale signaal-ruisverhouding worden weergegeven. Daarvoor wordt het spraaksignaal volgens het al eerder genoemde principe bij het telefoonsignaal opgeteld en van het microfoonsignaal afgetrokken. Extra correctiefilters (Fir-filter 1 en 2) compenseren voor de overdracht van het spraaksignaal van telefoon naar microfoon. Fir-filter 1 heeft dezelfde overdracht karakteristiek als die van telefoon naar microfoon. Fir-filter 2 dient ter compensatie van vertraging veroorzaakt door Fir-filter 1. Op deze wijze wordt het spraaksignaal optimaal uit het microfoonsignaal verwijderd. De spraakcommunicatie is dan onafhankelijk gemaakt van de werking van het ANR-systeem. Voor een optimale verstaanbaarheid kan onder de oorkap het niveau van het lawaai en het niveau van lawaai in combinatie met spraak worden gemeten. De DSP detecteert voor de aanwezigheid van het spraaksignaal. Uit deze gegevens is, in zekere mate, de spraak-lawaai-verhouding onder de oorkap te bepalen. Het spraakbewerkingfilter kan het spraaksignaal nu zodanig filteren dat binnen, de voor spraak relevante, frequentiebanden een optimale signaal-ruisverhouding (maximale verstaanbaarheid) wordt verkregen. Aanpassing van het spraaksignaal en instelling van het spraakniveau moet binnen bepaalde grenzen plaatsvinden. Er moet bijvoorbeeld worden voorkomen dat het spraaksignaal zo luid wordt dat het beschadiging van het gehoor tot gevolg kan hebben. Het spraakbewerkingfilter kan tevens worden toegepast voor individuele aanpassing van het spraaksignaal, bijvoorbeeld door te compenseren voor de verminderde gehoorscherpheid van een specifieke gebruiker.

## Conclusies

Actieve geluidreductie is voornamelijk effectief voor laagfrequent lawaai. Actieve geluidreductie in de oorkap kan goed worden toegepast als aanvulling op de gehoorbescherming.

Hierbij moeten wel de akoestische omstandigheden, lawaaispectrum, laagfrequente trilling en de stabiliteit van het systeem in beschouwing worden genomen. Een verkeerde toepassing van ANR kan een averechts effect tot gevolg hebben.

Actieve geluidreductie kan ook worden toegepast voor het verbeteren van de verstaanbaarheid van de spraakcommunicatie die door de telefoons in een headset worden weergegeven. Voor bepaalde laagfrequente lawaaibronnen is aanzienlijke winst in spraak-lawaai-verhouding te realiseren.

Door toepassing van digitale technieken en het inbrengen van adaptief gedrag kan een ANR-systeem compenseren voor de beperking van de analoge varianten. De mate waarin ANR wordt toegepast hangt dan af van de akoestische omstandigheden (lawaaispectrum, juiste

passing op het hoofd). Het systeem biedt de mogelijkheden te optimaliseren naar optimale gehoorbescherming of verstaanbaarheid. Tevens kan met meetsignalen de stabiliteit van het systeem worden bewaakt, en zondig worden bijgeregeld.

## Referenties

- Steeneken, H.J.M. & J.A. Verhave (1997), "Personal Active Noise Reduction with integrated Speech Communication Devices: development and assessment," in *AGARD conference proceedings 596 "Audio effectiveness in aviation"*, Neuilly-sur-Seine France: AGARD.
- IEC Std. 60268-16 2<sup>nd</sup> edition (1998), "Sound system Equipment. Part 16: objective rating of speech intelligibility by speech transmission index," Geneva, Switzerland.
- Wijngaarden, S.J. van & Steeneken, H.J.M. (1999). "Sound exposure and speech intelligibility in Royal Netherlands Air Force Chinook helicopters". In: *Proc. Internoise99*, 639-644.