

Adaptatie van hoorapparaten... en zo..

Inleiding

'Er is geen orgaan dat zo onder invloed staat door invloeden van buitenaf als onze hersenen'. Bovendien is het adaptatievermogen van ons brein het grootst tijdens de jeugd. Bij het vierde jaar is zo'n 90% van onze hersenen ontwikkeld doch ze zijn pas 'klaar' rond ons 25-ste jaar.

Deze uitlatingen komen niet van mijzelf maar van hersenwetenschappers als Dick Swaab. Waarom breng ik dit in verband met hoorapparaten?

Opvallend is dat hardhorend wordende oude mensen vaak slecht revalideren als zij hoorapparaten gaan dragen. Zij horen wel weer van alles maar het volgen van een gesprek blijft problematisch vooral in een rumoerige of galmende omgeving. Dat heeft te maken met het afgenomen adaptatievermogen van de hersenen en minder motivatie om 'het te leren' (ze hebben ze niet in als ze alleen zijn bijvoorbeeld). Ook hyperacusis kan een rol spelen.

Bijna dove jonge kinderen



Doofheid (of een gehoorverlies van meer dan 90 dB) kan aangeboren zijn. Zulke kinderen zijn dan prelinguaal doof. Als doofheid optreedt na het 5^e jaar, heet zo iemand postlinguaal doof. Deze mensen hebben reeds 'taal verworven', het taalcentrum in de hersenen is ontwikkeld zodat zij een ander aanbod van taal sneller zullen 'verstaan'.

Bij een gehoorverlies van >90 dB is dat niet meer te corrigeren met een 'gewoon' hoorapparaat dat het geluid versterkt en in de hoorgang of op het rotsbeen (beengeleider) aanbiedt. Wat overblijft is een cochleair implantaat - kortweg CI - een [electronisch implantaat](#) dat [geluid](#) omzet in elektrische impulsen die de gehoorzenuw in de cochlea (slakkenhuis) direct stimuleren. De hoorfunctie van buiten-, midden- en binnenoor inclusief de 16.000 trilhaartjes in de cochlea wordt overgenomen door (maximaal) 24 elektroden van een cochleair implantaat. Dat implantaat is slechts de helft van het geheel. Het wordt gestuurd door een digitale spraakprocessor (achter het oor, zie foto hierboven) die het signaal doorgeeft aan de oppikspoel van het implantaat onder de huid. Daar zit een magneetje in zodat het blijft zitten.

Afhankelijk van veel factoren kan een mens daarmee leren horen, dat wil zeggen: spraakverstaan. De resultaten voor muziek zijn uiterst pover. Het aangeboden signaal dat rechtstreeks in de cochlea wordt aangeboden, lijkt in de verste verte niet op de prikkels die in een gezond oor plaatsvinden! Het inwendige onderdeel van een CI is al geschikt voor baby's van 6 maanden oud. (Deze technieken zijn van deze eeuw, dus is de ontwikkeling nog in volle gang.) In de kritische periode tussen 7 maanden en 2 jaar ontwikkelen peuters zich het meest qua spraak- en taalontwikkeling. De hersenen ontwikkelen in die periode hun auditief geheugen.

Postlinguaal doven behalen tegenwoordig na implantatie een foneemscore van gemiddeld meer dan 80% als er niet te lang gewacht wordt met de implantatie.

Eerste conclusie

De adaptatie van de hersenen betreffende spraak kan zeer groot zijn afhankelijk van de voorgeschiedenis van de patiënt in kwestie. Baby's (prelinguaal e doven) kunnen zelfs hun auditief geheugen opbouwen met totaal vreemde signalen die spraak moeten voorstellen. Postlinguaal doven blijven echter slechthorend. Mensen die nooit spraak aangeboden hebben gekregen voor hun vijfde, zullen het met een CI ook niet meer leren. Hun spraakgeheugen is gevuld met gebarentaal. (Over dit laatste ben ik niet zeker. Van Kempen [oorarts in het St. Annaziekenhuis in Geldrop] spreekt dit tegen.)

Hardhorenden

Hoe zit het dan met hardhorenden? Ook hier geldt dat de correctie met een hoorapparaat niet vroeg genoeg kan worden aangewend. Ik ga er vanuit dat een eventuele geleidingsdoofheid operatief is gecorrigeerd zodat we het verder over perceptiedoofheid hebben. Vaak betekent dit een verlies van de hoge tonen: 'perceptiedoof aan de hoge kant'. Zo lang het gehoor, al of niet gecorrigeerd, doorloopt tot zo'n 5 kHz, is er voor spraak nauwelijks een belemmering. De consonanten worden verstaan al of niet ondersteund door aflezen. Slecht articulerende mannen met snorren en baarden blijven problematisch. Maar er is meer:

Dynamiek en richting

Een kwinkslag binnen een groter gezelschap gaat vaak verloren doordat het 'ondergaat' in de andere stemmen. Dit komt omdat een hoorapparaat een kleinere dynamiek heeft dan het gezonde menselijk oor (60 tegenover 120 dB) die niet te overbruggen is en mede omdat het bepalen van de richting waar

het grapje vandaan komt minder nauwkeurig bepaald kan worden. Vervorming speelt ongetwijfeld ook een rol.

Voor de muzikaliteit is een hoorapparaat geen belemmering. Je kunt uitstekend horen of een koor vals zingt, er vanuit gaande dat je muzikaal bent. Er zijn plenty goedgehorenden die zoiets helemaal niet opvalt. Daar gaan we het verder niet over hebben.

Vervorming

Een gezond menselijk oor blijkt verre van ideaal te zijn als we de vervorming die het voortbrengt (met name intermodulatie) in ogenschouw nemen: twee fluittonen rond de 1000 Hz die 200 Hz verschillen produceren in het oor keurig een extra toon van 200 Hz (als het een beetje hard gaat). *Mozart vroeg eens aan Salieri: Weet U wat valser is dan een fluit? Twee fluiten....*

Het vreemde is dat een audio installatie met dezelfde hoeveelheid en soort vervorming feilloos onderscheiden wordt van een die dat niet heeft. Het is nog veel gekker: een hard voortgebrachte toon wordt duidelijk lager waargenomen (als je hem apart aanbiedt) dan een zachte op dezelfde frequentie. Toch hebben we er geen last van bij een live orgelconcert waar flink uitgedrukt wordt. Daar staat tegenover dat goedkope platenspelers waarbij het toerental iets zakte bij harde muziek als jankers ervaren worden....

We zijn inmiddels bij de muziek aangeland, dat zal de lezer begrepen hebben.

Compressie

Hoe zit het dan met compressie? Het menselijk gehoor heeft een dynamisch bereik van 120 dB. Dat kunnen we in onze huiskamer nooit voor elkaar krijgen, zelfs niet als het 'natuurlijke' achtergrondgeluid slechts 30 dB is.

Wel, ons gehoor krijgt dat ook alleen voor elkaar met zo'n 30 dB compressie door de spiertjes die aan onze hoorbeendjes zitten en het variëren in lengte van de trilhaartjes in de cochlea. Het ene oor beïnvloedt zelfs het andere daarbij en dat gaat (in HiFi-termen) niet zachtzinnig. (Er zijn nog meer compressiemechanismen die we hier laten voor wat ze zijn.)

Kortom, onze oren maken er een zootje van!

Adaptatie

Als ik oogdeskundigen mag geloven, maken onze ogen heus niet zo'n scherp plaatje. Hoe krijg je trouwens een vierkant afgebeeld op een bolvormig netvlies? Toch zien we onmiddellijk dat het schilderij bij oma scheef hangt! Dit raadsel is inmiddels opgelost want er zijn sinds kort camera's 'die je niet scherp meer hoeft te stellen'. *Achteraf* maakt hij er een scherp plaatje van.... Kennelijk zit er in zo'n beeld voldoende informatie om het scherp te krijgen.

Blijkbaar hebben **onze hersenen** het vermogen om van een gebrekkig beeld iets moois te maken met scheef schilderij en al.

Zelfs nystagmus geeft geen bewegend beeld! [http://nl.wikipedia.org/wiki/Nystagmus_\(aandoening\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Nystagmus_(aandoening))

Met geluid is dat niet anders: alle eigenaardigheden van onze oren worden keurig bijgewerkt door ons brein! Dat kan natuurlijk alleen maar omdat het betreffende hersengedeelte getraind is met diezelfde oren. Zelfs zo goed dat we bepaalde zaken erg goed kunnen waarnemen! Een kleine verkoudheid gooit echter al roet in het eten.

Adaptatie van hoorapparaten

Waarom zou 'een verlenging' van ons oor in de vorm van een hoorapparaat dan niet meegenomen kunnen worden in het algoritme dat in ons hoofd zit? Kan iemand met hoorapparaten bijvoorbeeld een geluidsinstallatie beoordelen? Voor een public address installatie in een kerk vind ik dat evident al zijn maar weinigen het met me eens. Voor mij (u heeft inmiddels wel begrepen dat ik hoorapparaten draag, waarover later meer) is zo'n installatie toch gemaakt? Het wordt anders als je voor een landelijke club ESL-bouwers komt vertellen 'hoe je het moet doen'. Je moet dan niet vreemd opkijken als je (vooraf) in de wandelgangen een opmerking hoort als: "Die man met die knobbels achter zijn oren gaat ons vetrullen hoe wij luidsprekers moeten maken?" Ja dus!

Want het is inderdaad zo dat je hersens hoorapparaten mee kunnen nemen in "hun correctie"!

Dat gaat niet op slag of stoot. Na de aanschaf van nieuwe hoorapparaten moet ik, afhankelijk van het verschil tussen de oude en de nieuwe, zo'n drie maanden geduld hebben voordat ik weer alle subtiele verschillen hoor tussen een PCM1704 en een PCM1792 DAC. Dat komt ook niet vanzelf. Ik moet oefenen, veel luisteren, vooral naar live muziek.

Eisen aan hoorapparaten

Hoeveel is mijn gehoorverlies? Ik ben perceptiedoof aan de hoge kant. Het meeste is aangeboren al begint mijn leeftijd (*1938) ook zijn tol te eisen.

Schrik niet: mijn linker oor komt inmiddels niet veel verder dan 3,5 kHz als we 60 dB als grens nemen en mijn rechter oor houdt er bij 8 kHz mee op. De helling waarmee het hoog afvalt is zo'n 4 dB/octaaf. Ik heb géén hyperacusis, anders kun je wel ophouden. De pijngrens ligt duidelijk boven de 120 dB.

In het laag ben ik nog zo'n 20 dB kwijt.

In de loop der decennia heb ik geleerd dat heus niet elk hoorapparaat geschikt is voor een audiofiel. Om te beginnen moet het uitgangsvermogen zo groot mogelijk zijn, ook al vraagt het hoorverlies daar niet om. Dat is om de dynamiek (hooguit 70 dB) zo groot mogelijk te maken. **Je moet niet uit zijn op een zo onzichtbaar mogelijk apparaat!** Als je je geneert voor hoorapparaten, kun je de HiFi-hobby maar beter vaarwel zeggen. Er twee soorten hoorapparaten op na houden (mooie kleine voor op het werk etc. en grote voor muziek) werkt niet! Met een bril kan dat, met hoorapparaten niet! Om je hersens de gewenste correctie te laten aanleren, moet je de apparaten van het moment dat je wakker wordt tot je naar bed gaat, dragen! Revalideren dus.



Vergeet het dat je een 'normaal horende' kunt worden. Neem genoeg met zo'n 20 dB verlies over het hele audiogebied. Neem ouderwetse oorstukjes met een dik slangetje, niet zo'n "mooi dun" slangetje met zo'n klein napje er aan voor in het oor zoals de blauwe hierboven. De eerste 10 – 15 dB ben je dan al kwijt. Dit moet je niet verwarren met de moderne digitale apparaten waarbij het telefoontje (in de hoorapparatenwereld stevast 'receiver' genoemd) in de hoorgang zit zoals hiernaast. Er loopt dan een dun *kabeltje* van het apparaat achter het oor naar dat telefoontje. Bij weinig hoorverlies zit zo'n telefoontje in een siliconenrubber stopje. Bij meer hoorverlies moet dat toch in een (wellis-waar klein) oorstukje komen. Het ontluftingsgat in het oorstukje minsten op 1 mm (laten) boren, als het kan 2. De lage tonen komen dan rechtstreeks het oor in, die hoeven niet versterkt te worden. Dat is gunstig want in de lage tonen zit immers het meeste vermogen. Boor het 'geluidskanaal' in het oorstukje (hiernaast) op tot zo'n 3 of 4 mm als er ruimte voor is. Laat de frequentiekaracteristiek oplopen met de helling van het verlies. Laat de karakteristiek aan de hoge kant niet verder doorlopen dan zinnig. Mijn linker oor hoort toch niets meer boven de 3,5 kHz. Ik laat het apparaat daar dan ook (abrupt) afvallen!

Laat de frequentiekaracteristiek oplopen met de helling van het verlies. Laat de karakteristiek aan de hoge kant niet verder doorlopen dan zinnig. Mijn linker oor hoort toch niets meer boven de 3,5 kHz. Ik laat het apparaat daar dan ook (abrupt) afvallen!

Laat de frequentiekaracteristiek oplopen met de helling van het verlies. Laat de karakteristiek aan de hoge kant niet verder doorlopen dan zinnig. Mijn linker oor hoort toch niets meer boven de 3,5 kHz. Ik laat het apparaat daar dan ook (abrupt) afvallen!

Laat de frequentiekaracteristiek oplopen met de helling van het verlies. Laat de karakteristiek aan de hoge kant niet verder doorlopen dan zinnig. Mijn linker oor hoort toch niets meer boven de 3,5 kHz. Ik laat het apparaat daar dan ook (abrupt) afvallen!

Analoog of digitaal

De vraag is nu of het een analoog of een digitaal hoorapparaat moet worden. In de digitale apparaten kunnen van allerlei correcties aangezet worden. **Laat alles uitzetten!!** Althans in het programma dat voor muziek bedoeld is. Vooral het anti-rondzing-mechanisme moet uit. Dat begint mee te jengelen op langere muziektönen. Een van de voordelen van een digitaal apparaat is dat de frequentiekaracteristiek nauwkeurig ingesteld kan worden. Vaak zit er een equalizer in met wel 18 kanalen. Daar kan zeer scherp mee gefilterd worden zodat het apparaat echt ongevoelig wordt buiten het hoorgebied van de oren. (Bij mij boven de 3,5 en 8 kHz) **Dat is belangrijk.** Het apparaat loopt dan in ieder geval niet vast op hoge frequenties die je toch niet hoort, zoals schijfremmen van een auto! Bij een analoog apparaat kan dit niet.

Een zeker niet onbelangrijk punt is hoe *vastlopen* 'afgewerkt' wordt. Een analoog apparaat kan nog zo mooi zijn en nog zo veel vermogen leveren maar vroeg of laat loopt het vast. Op zich is dat helemaal niet erg. Het vervelende is dat er vele harmonischen bijgemaakt worden en dat het 'herstel' lang duurt. In een digitaal apparaat dat van tijd tot tijd ook vast zal lopen (je zou eens kunnen proberen of de compressiemogelijkheid bevalt maar ik vind van niet) treden veel minder harmonischen in het audiogebied op en het herstel is instantaan als er een behoorlijke ADC (analoog-digitaal converter) in zit.

Ik heb hier een aantal zaken opgenoemd die de hersenen niet kunnen corrigeren. Wat er niet is, is er niet. Bijmaken kunnen hersenen ook niet. (Afgezien van tinnitus.)

Ik zal nooit een oordeel over een tweeter kunnen vellen die kuren heeft boven de 10 kHz. Pas op dat je niet denkt dat ik de helft van het spectrum mis. Je moet logaritmisch denken: het menselijk gehoor heeft een bandbreedte van acht octaven waarvan ik er links drie mis en rechts anderhalf... Er blijft nog genoeg over. De klank van instrumenten en de plaats waar ze in het stereobeeld staan, kan ik goed beoordelen, veel beter dan niet geoefende goedhorende mensen te meer daar ik regelmatig live muziek hoor.

Analoog of digitaal en HiFi

Over analoog of digitaal is nog wel het een en ander te zeggen: de eerste CD-spelers van de 80-er jaren klonken niet zo fijn. Er zijn nog steeds mensen die liever van vinyl spelen. Wat is er aan de hand? Ik kom daar zo op terug. Hoe komt het dat NP3 vaak niet om aan te horen is?

We moeten twee zaken onderscheiden: **amplitude compressie** en **digitale compressie**.

Analoge (amplitude) compressie

Naar mijn mening is (nette) analoge compressie niet zo erg. Je zult wel moeten als je een live instrument nog in je kamer wilt weergeven. Het heeft een grotere dynamiek dan een audio-installatie kan weergeven. Twee huizen bij mij vandaan woont een conservatoriumdocent met twee Steinways in dezelfde kamer als ik heb, dus ik kan vergelijken....

Over dynamische compressie van spraak gesproken: als zendamateer comprimeer je de spraak die je uitzendt zo'n 30 dB om met het beperkte zendvermogen toch verstaanbaar te zijn aan de andere kant van de wereld. In de ontvanger zitten scherpe filters die alles buiten het audio-bandje van 300 Hz tot 2,5 kHz scherp afkappen om de atmosferische- en *man made noise* kwijt te raken. Na veel oefenen kun je daarmee goede verbindingen maken. Ik ben al vanaf 1958 zendamateur en heb dus de nodige training. Ik kan al verbindingen maken terwijl ongeoeffenden niet eens horen dat er aan de andere kant gesproken wordt!

Op deze website staan twee audio-opnamen die zwaar gecomprimeerd zijn. Het klinkt uiteraard hard zonder verlies van veel subtiele informatie: water blijft nat en de geluiden staan goed in het klankbeeld.

Digitale compressie

In de beginperiode van de cryptophonie, eind jaren 60, was de digitale techniek nog niet zo ver gevorderd. De woordlengte van spraaksampels was 4, soms 6 bits. We weten inmiddels dat de dynamiek daarvan klein is, maar we weten ook (zie boven) dat dat voor spraak niet belangrijk hoeft te zijn. Collega's konden dat soort crypto signalen helemaal niet verstaan, dus vroegen ze mij (geoeffende zendamateur) om er eens naar te luisteren. Ik bakte er ook geen hout van!

Het heeft toch een hele tijd geduurd voordat ik wist waar het probleem zat. Bij (zelfs zeer sterk) amplitude gecomprimeerde signalen kan ik spraak blijven verstaan. Kennelijk zijn de **nuldoorgangen** van het audio-signaal bepalend. Als je daaraan gaat morrelen, neemt de verstaanbaarheid met rasse schreden af! Bij het verkleinen van de 'woordlengte' (het aantal bits in data-woord) tot bv. 6 bits worden de nuldoorgangen van het uiteindelijke audio-signaal te veel verplaatst van de oorspronkelijke nuldoorgang!

Zijbandruis = jitter

Het werd mij ineens duidelijk waarom de ene SSB radio-ontvanger onder moeilijke omstandigheden (kleine signalen in een 'rumoerige' omgeving) zich beter gedraagt dan de andere. Dit soort ontvangers zijn allen superheterodyne radio's, dus zit er een mengtrap in die de ontvangen frequentie omzet naar een middenfrequentie (deze website staat bol van deze techniek, dus laat ik het hier even bij).

Voor SSB (single side band met onderdrukte draaggolf) wordt er in de ontvanger bovendien weer een draaggolf toegevoegd om er verstaanbare audio van te maken. Het verschil bleek voor het leeuwendeel in de kwaliteit van de **oscillatoren** te zitten! Uiteraard moet die langeduur stabiel goed zijn omdat je anders met de hand aan de knop moet blijven zitten om de stem op de juiste toonhoogte te houden. (Dat steekt overigens voor de verstaanbaarheid niet op 100 Hz als je daar aan gewend bent.) Bij nader onderzoek bleek de zijbandruis, de korteduur stabiliteit, verantwoordelijk. Het is niet zó dramatisch (een goede loslopende LC-oscillator is voor kortegolf toerijkend) maar veel in de handel zijnde Japanse transceivers van weleer waren uitgerust met *frequency synthesizers* met een PLL die de nodige zijbandruis (= jitter) veroorzaakten. Dat geeft reciproke menging (wat op een rumoerige band ook de nodige problemen geeft) die ontstaat door ruis op een afstand van 5 – 10 kHz van de draaggolf, maar er was geen sterveling die eens ging meten op bv. 1 kHz afstand van de draaggolf, laat staan 100 Hz. Jitter op lage frequenties is verantwoordelijk voor slechtere verstaanbaarheid.

Jitter op hogere frequenties (>200 Hz bv.) geeft een slechtere signaal-ruisverhouding. [We spreken van zijbandruis in het frequentiedomein en van jitter in het tijddomein.]

Nu is meten op 100 Hz van de draaggolf ook geen scenecure.

Wat wil het geval? Australische zendamateurs beschikken slechts over een 10 kHz-bandje bovenin de 80 meterband (3,8 MHz). Over die afstand op 80 een verbinding maken is erg moeilijk. Ik had als eerste oscillator in mijn ontvanger (tijdelijk) een Xtal (kristal) oscillator in gebruik en bleek veel beter in staat om Australië en Nieuw Zeeland te bereiken dan andere amateurs met veel betere antennes dan ik ooit in de stad zou kunnen maken. Verbazing alom en niet in de laatste plaats van mijzelf.

Nog niks in de gaten tot er verhalen over '**jitter** op de clock' bij AD- en DA-conversie verschenen! De lezer moet goed begrijpen dat een Xtal-oscillator in een radio altijd goed genoeg is, dus maakte ik mij geen zorgen over de Xtal-oscillator in mijn CD-speler die het clock signaal opwekt.

Totdat, ja, totdat mij door Guido (TentLabs) gevraagd werd "de ultieme clock oscillator" te maken. Dáár heb ik gehoord wat voor verschil een clock met een jitter van minder dan 0,3 ps in een CD-speler voor verschil maakt! Alle bezwaren tegen digitale audio verdwijnen als sneeuw voor de zon (als je de rest ook goed doet).

Bij AD- en DA-conversie is niet alleen de jitter op de clock oscillator van belang maar ook de sampling rate. Als je digitaal wilt comprimeren, zul je 'dingen' uit het signaal moeten weglaten. Er zijn hele volkstammen mee bezig om daarvoor algoritmen te ontwikkelen. NP3 is een digitaal gecomprimeerd signaal. Daar ontbreekt het een en ander. Nu hangt het (afgezien van de sampling rate) van het soort audio af wanneer dat hinderlijk wordt. Voor popmuziek komt het kennelijk niet zo nauw....

De Hamvraag

Wat voor clock oscillator zit er in digitale hoorapparaten? Anders geformuleerd: welke latency (doorlooptijd) van microfoon naar telefoon is toelaatbaar? Wanneer wordt dat hoorbaar? Ik kan het met mijn digitale apparaten niet vaststellen, maar, nog belangrijker, hoeveel jitter op de clock (die zowel voor de AD- als de DA-conversie voor en achter de DSP wordt gebruikt) is nog toelaatbaar? Die zal afhankelijk zijn van de latency, of valt dat mee? Kunnen mijn hersenen dat ook leren compenseren?

Van Internet (IEEE):

A 0.3 V all digital crystal-less clock generator (CLCG) is presented for a hearing aid application. The all digital CLCG uses frequency difference between the ring oscillator and the digital controlled oscillator (DCO) to create a mapping table under process and temperature variations. The digital loop filter (DLF) adopts a successive-approximation register (SAR) algorithm for fast locking time. Thus, the worse case of locking time is 73 output cycles. For a hearing aid application, the core area of CLCG and hearing aid system are $62 \times 78 \mu\text{m}^2$ and $1900 \times 1920 \mu\text{m}^2$, respectively, in 65 nm CMOS process. The frequency accuracy is 12 MHz \pm 3.5% in four test chips. The power consumption is 5 μ W. In the period jitter, the RMS and peak-to-peak jitters are **326.4 ps** and 2.05 ns, respectively. The frequency drift is smaller than \pm 4.3% from 0 to 100°C. Thus, this work is also used for energy harvester applications.
stemt niet optimistisch.

Eindhoven, 11-7-2014.