

Høreapparater, Beethoven og en Ananas

Af Jonathan Mirpourian, Ph.D.

Februar 2026

Året er 1805. Klokken er midnat. Gaderne i Wien er mørke og stille, undtagen for et enkelt lys som brænder i et vindue. Endnu en nat sidder Ludwig van Beethoven sent ved sit klaver og skriver på sin femte symfoni. Han skriver med en præcis men hastig hånd. Han ved, han har travlt. Hver dag han tilbringer ved sit klaver kan han høre lydene mindre og mindre. Toner bliver tabt for ham. Han er ved at blive døv.

Igennem resten af sit liv mister Ludwig van Beethoven mere og mere af sin hørelse, indtil han til sidst er fuldstændig døv. Og hans skæbne er langt fra unik. Verdenssundhedsorganisationen forventer, at næsten 2,5 milliarder mennesker vil leve med en eller anden grad af hørenedsættelse i 2050¹. Heldigvis kan langt de fleste hjælpes med moderne høreapparater. Men selv moderne høreapparater har en udfordring: nogle gange begynder de at hyle og pibe, fordi lyden “løber i ring”, det vi kalder feedback. Og det er præcis det, mit ph.d.-projekt handler om. Jeg hedder Jonathan, og jeg forsker i, hvordan strukturel optimering kan bruges til at designe bedre høreapparater, så din bedstefar kan høre bedre!

Alle Veje Fører til Feedback

Høreapparater er bittesmå enheder som fæstnes på øret. De indeholder mikrofoner som opfanger lyde udefra, en forstærker som gør lydene højere, og en lille højttaler som sender de forstærkede lyde ind i øret. På den måde

kan mennesker med høreproblemer genvinde dele af deres hørelse. En af de store udfordringer med høreapparater er et fænomen kaldet feedback. Feedback opstår når høreapparaternes mikrofon begynder at optage lydene som kommer fra egen højttaler. Dette skaber et loop hvor lydene bliver forstærket igen og igen, indtil det resulterer i en høj pibende lyd. Det er en lyd som de fleste har stiftet bekendtskab med, for eksempel i et online møde når en kollega glemmer at slukke sin mikrofon (jeg snakker om dig Anders), eller når en musiker står for tæt på sin højttaler. For høreapparater er feedback et stort problem, da det kan skabe så stort ubehag for brugeren og i værste fald gøre apparatet ubrugeligt.

Feedback i høreapparater opstår hovedsageligt på to forskellige måder. Den første er, når lyden fra højttaleren siver ud af øret, bevæger sig gennem luften, og bliver optaget af mikrofonen igen. Dette kaldes også akustisk feedback. Akustisk feedback kan minimeres meget effektivt ved hjælp af software. Helt enkelt kan høreapparatet programmeres til at genkende de lyde, som kommer fra egen højttaler, og filtrere dem ud af det samlede lydsignal. Har vi så løst problemet? Desværre ikke. Der er nemlig også en anden måde feedback kan opstå på, nemlig strukturel feedback. Strukturel feedback opstår, når lydbølgerne fra højttaleren ikke primært rejser gennem luften, men derimod rejser gennem selve kroppen af høreapparatet og får det til at vibrere, og disse vibrationer kan så “ryste” mikrofonen. Man kan nemlig optage lyd både ved at tale ind i en mikrofon,

¹<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss> (Last visited: 01.02.2026)

men også ved at påvirke den mekanisk (for eksempel ved det klassiske tap tap med fingeren på mikrofonen). Det betyder, at et høreapparat i praksis er en vibroakustisk struktur, fordi der er to koblede fysikker i spil: bølgeudbredning i strukturen (vibrationer) og bølgeudbredning i luften (akustik). Og netop koblingen mellem de to fysikker gør problemet svært: strukturelle bølger kan bevæge sig hurtigt og effektivt gennem materialet og nå mikrofonen via mekaniske veje, som software ikke kan "se" eller filtrere væk, før signalet allerede er opfanget. Struktural feedback er derfor meget sværere at løse end akustisk feedback. Bølgerne kan nemlig bevæge sig hurtigere gennem strukturen af høreapparatet end gennem luften, og det er derfor ikke muligt at filtrere struktural feedback ud af lydsignalet, før det når mikrofonen. Det stiller sig derfor spørgsmålet:

Hvordan kan vi udforme strukturen, så vibrationer dæmpes, afkobles eller ledes væk fra følsomme komponenter? Disse spørgsmål kan tackles effektivt med strukturel optimering og sjovt nok har naturen løst lignende problemer i millioner af år. For at illustrere idéen tager vi en lille omvej forbi en af naturens mest effektivt organiserede konstruktioner: Ananasen.

Ananas ligningen: Mere Sol = Mere Ananas

Har du nogensinde overvejet hvorfor en ananas ser ud som den gør? Heller ikke mig.

Men det viser sig faktisk at en ananas er en mester i strukturel optimering. Forestil dig at du er en ananas som vokser i en tropisk skov. Din største drøm i verden er at blive så stor en ananas som muligt. For at gøre det, skal du absorbere så meget sollys som muligt, så du kan fotosyntetisere og vokse dig stor og stærk.

Du starter derfor med at vokse et blad. For at opsamle mere sollys, beslutter du dig for at vokse et nyt blad og placere det 90 grader i forhold til det første blad så du ikke kaster nogen skygge på det første blad. Nu kan du opsamle dobbelt så meget sollys. Du beslutter dig for at vokse et tredje og fjerde blad, og igen placere dem 90 grader i forhold til det forrige blad. Men nu løber du ind i et problem. Hvert nyt blad du vokser skygger nemlig for en del af de tidligere blade. Du stiller dig derfor spørgsmålet: Hvad skal vinklen være mellem hvert blad for at maksimere min samlede opsamling af sollys? Tillykke, du har netop opstillet et strukturelt optimeringsproblem. Dine blade er din struktur og vinklen mellem dem skal optimeres til at maksimere din opsamling af sollys. Opstiller man problemet matematisk finder man faktisk ud af at en vinkel på 137.5 grader² fra blad til blad er den optimale vinkel for at maksimere sollysoopsamling³. Denne vinkel kaldes også for den gyldne vinkel og kan findes i mange andre naturlige strukturer som for eksempel i frøstævner i solsikke og i skaller på snegle.

Præcis samme optimeringsprincipper kan anvendes til at designe optimerede vibroakustiske strukturer. I stedet for blade som skal optimeres for at maksimere sollysoopsamling, kan man forestille sig en masse små LEGO-klodser som man skal bygge en struktur med. Hver LEGO-klods kan enten være materiale eller hulrum (luft). Ved at optimere placeringen af materiale og hulrum i legosættet, kan man designe strukturer med specifikke vibroakustiske egenskaber. Dette er præcis hvad jeg har gjort i mit ph.d.-projekt. I mit ph.d.-projekt har jeg udviklet nye metoder til at optimere placeringen af materiale og hulrum i vibroakustiske strukturer for at manipulere hvordan bølger opfører

²Okabe, T. Biophysical optimality of the golden angle in phyllotaxis. Sci Rep 5, 15358 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep15358>

³en god fun fact til din næste trivia aften

sig i dem. Jeg har skabt nye metoder til at inkludere den komplekse kobling mellem vibrationer og akustik i optimeringsprocessen, noget som tidligere har været en stor udfordring. Ved hjælp af det lykkedes mig at designe nye og innovative vibroakustiske strukturer, som for eksempel et vibroakustisk sort hul. Ligesom et astrofysisk sort hul, der opsluger alt i nærheden, selv lys, er et vibroakustisk sort hul en struktur, der ”sluger” lyd, så næsten intet bliver reflekteret tilbage. Det opnås ved at designe strukturen, så energi absorberes optimalt gennem et samspil mellem vibrationer i materialet og akustik i luften.

Kan din bedstefar høre bedre nu?

Næsten. Metoderne fra mit ph.d.-projekt gør det muligt at designe vibroakustiske strukturer langt mere effektivt. Det er et vigtigt skridt mod bedre høreapparater, hvor uønskede vibrationer og feedback kan dæmpes allerede i selve konstruktionen. Men metoderne rækker længere end høreapparater: de kan også bruges til at forbedre andre vibroakustiske systemer, for eksempel vindmøller og støjdæmpning i motorvejsbarrierer. Så kan din bedstefar måske ikke bare høre højere, men også tydeligere, længere og mere komfortabelt.