

## Geluid in beeld

***Citation for published version (APA):***

Roozen, N. B. (2004). *Geluid in beeld*. Technische Universiteit Eindhoven.

***Document status and date:***

Gepubliceerd: 01/01/2004

***Document Version:***

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

***Please check the document version of this publication:***

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

***General rights***

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

***Take down policy***

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# TU/e

technische universiteit eindhoven

Intreerede  
17 september 2004

prof.dr.ir. N.B. Roozen

## geluid in beeld

/ faculteit werktuigbouwkunde

---

Intreerede

Uitgesproken op 17 september 2004  
aan de Technische Universiteit Eindhoven

# Geluid in beeld

prof.dr.ir. N.B. Roozen

# Inleiding

## **Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,**

Vandaag wil ik u een beeld schetsen van mijn vakgebied 'Acoustics and noise control', in het Nederlands vertaald als 'Akoestiek en lawaai-beheersing'. Ter inleiding wil ik eerst stilstaan bij de centrale rol die geluid hierin speelt. Geluid is altijd aanwezig, elke seconde van ons leven. Op ons werk horen we industrieel geluid van productiemachines, op straat horen we transportgeluid van auto's en vrachtwagens, in huis horen we communicatief geluid van stemmen of telefoon, in de bioscoop of theater horen we recreatief geluid van muziek. Zelfs in een stille omgeving als een slaapkamer horen we het tikken van een klok.

Als we kijken naar onze vijf zintuigen horen, zien, voelen, ruiken en proeven, dan kunnen we geluid waarnemen middels horen en voelen. Het horen van geluid is voor eenieder evident. Het voelen van geluid is wellicht minder evident. Toch is het zo dat een laagfrequent geluid, zoals de dreunende bas in popmuziek of een laag overvliegend vliegtuig, wordt ervaren als een trilling in de maagstreek. Geluid is in staat energie over te brengen op voorwerpen. Een ludiek voorbeeld hiervan is het akoestische bootje, ontworpen voor het afscheid van een collega akoesticus.

Een speciaal soort luidspreker in de achtersteven, vol uitgestuurd op een lage resonantiefrequentie, is in staat het bootje in geringe mate voort te stuwten. Door de speciale vorm van de luidspreker ontstaat er een impuls tijdens het uitblazen van lucht en een minder sterke, negatief gerichte impuls tijdens het aanzuigen. Het verschil in impuls levert de overigens geringe voortstuwingskracht. Een ander voorbeeld, in meer kwantitatieve termen: de hoeveelheid energie die wordt geproduceerd door een menigte voetbalsupporters in een voetbalstadion is net voldoende om een eitje te bakken [1]. Ondanks de geringe energie-inhoud kan geluid c.q. lawaai ook beschadigen. Lawaai kan ernstige gehoorbeschadiging bij mensen veroorzaken. De ernst van slechthorendheid als handicap wordt in het algemeen zwaar onderschat, evenals de risico's op gehoorbeschadiging door geluidsoverlast. Net als geluid is slechthorendheid vrijwel onzichtbaar, waardoor er weinig rekening mee gehouden wordt.



Geluid is dus hoorbaar en voelbaar, maar onzichtbaar in het dagelijks leven. Toch luidt de titel van mijn intreedende 'Geluid in beeld'.

Daar heb ik diverse redenen voor.

- Op de eerste plaats is geluid, en dan met name geluidsbeheersing, de rode draad in de onderzoeksonderwerpen van mijn leerstoel 'Acoustics and noise control'. Dat ik het fenomeen geluid zeer duidelijk 'in beeld' heb hoop ik u in de rest van mijn betoog duidelijk te maken.
- Op de tweede plaats was geluid ook al eerder deze middag volop in beeld tijdens het mini-symposium 'Geluid in beeld'. Daarin is belicht welke geluidsproblemen in de industrie spelen. De symposiumonderwerpen betroffen geluid in MRI-systemen, van vrachtauto's en van banden. In mijn onderzoeksonderwerpen is een belangrijk aandachtspunt de bruikbaarheid van ontwikkelde technieken in de dagelijkse praktijk van de industrie.
- Op de derde plaats is geluid steeds belangrijker in onze samenleving. Geluidsoverlast is het onderwerp van steeds strengere regelgeving, zowel op nationaal als internationaal gebied. Verder gaan consumenten steeds meer letten op het geluidsniveau van huishoudelijke apparatuur, auto's, etc. In het algemeen kan gesteld worden dat eenieder, politiek en particulier, zich bewust aan het worden is van geluid en geluidsoverlast. Eenieder heeft, in meer of mindere mate, geluid in beeld.
- Ten slotte, hoewel geluid onzichtbaar is voor ons oog kunnen we geluid in beeld brengen – in de letterlijke betekenis van het woord. Alsof we met een akoestische camera een kleurenfoto van geluid kunnen maken. Ik refereer hier aan de techniek van akoestische holografie waarop ik in het vervolg van mijn betoog nog uitgebreid terug zal komen.

Mijn vakgebied is 'akoestiek en lawaai-beheersing'. Het woord akoestiek wordt in het dagelijks leven veel gebruikt om de geschiktheid van een ruimte voor het beluisteren van muziek aan te geven. In de techniek wordt er een zeer breed vakgebied mee aangeduid. In een technisch woordenboek vond ik de volgende definitie van akoestiek. "Akoestiek is de wetenschap die de opwekking, voortplanting en waarneming van geluid omschrijft." Lawaai-beheersing houdt zich bezig met het gericht veranderen van geluid dat veroorzaakt wordt door apparaten. Geluidsreductie is hier een onderdeel van.

Geluid wordt al zeer lang bestudeerd door wetenschappers. In de 17<sup>e</sup> eeuw werd door Isaac Newton in zijn 'Principia' de basis gelegd voor de wiskundige beschrijving van geluidsvoortplanting. In zijn werk geeft Newton een, overigens niet geheel correcte, schatting voor de geluidssnelheid in lucht op basis van een theoretisch model, nog voordat men de geluidssnelheid had gemeten. Andere bekende namen in het vakgebied zijn Helmholtz, Bernoulli en Rayleigh met zijn boek 'theory of sound'. In de jaren 20 van de 20<sup>e</sup> eeuw heeft de technische akoestiek een grote groei doorgemaakt door ontwikkelingen op het gebied van de elektrotechniek. In die tijd is het vakgebied elektro-akoestiek ontstaan. In de jaren 50 van de 20<sup>e</sup> eeuw is op het gebied van de aero-akoestiek baanbrekend werk verricht door Lighthill. De laatste 30-40 jaar heeft de technische akoestiek zich sterk kunnen ontwikkelen, enerzijds als gevolg van het beter kunnen rekenen, anderzijds ook als gevolg van het beter kunnen meten. Een mooi voorbeeld hiervan is de toepassing van akoestiek voor medische doeleinden, zoals de echografie.

Het is duidelijk dat er veel ontwikkelingen hebben plaats gevonden. Akoestiek is dan ook een zeer breed vakgebied. Op een aantal deelgebieden zal ik mij aansluiten. In mijn rede zal ik u een beeld schetsen van de ontwikkelingen in de vakgebieden die mijn interesse hebben en waar ik een onderzoeksbijdrage wil leveren.

Het technische vakgebied akoestiek en lawaai-beheersing is zeer multidisciplinair van aard. Het vak heeft sterke interacties met de disciplines mechanica, materiaalkunde, elektromagnetisme, regeltechniek en elektronica. Vele van deze disciplines zijn ook terug te vinden in het vakgebied mechatronica, dat volgens de intreedende van collega Van Eijk [2] een synergetische mengeling is van precisiemechanica, elektronica, regeltechniek en systeemontwerp. Onze vakgebieden hebben dan ook veel raakvlakken met elkaar. Bij mijn werkgever Philips CFT is de discipline akoestiek en lawaai-beheersing ondergebracht in de afdeling mechatronica. Niet alleen in de industrie, maar ook in de academische onderzoeksweld is de multidisciplinaire aanpak van akoestiek en lawaai-beheersing een essentiële randvoorwaarde voor succes.

De situering van mijn leerstoel in de groep 'Dynamics and Control' van de faculteit Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven, waar de disciplines dynamica en regeltechniek van werk-

tuigbouwkundige constructies in één groep aanwezig zijn, vormt een goede voedingsbodem voor fundamenteel onderzoek op het gebied van geluidsbeheersing.

Voor de richtingsbepaling van het fundamenteel onderzoek is de relatie met de industrie essentieel. In het symposium van vanmiddag is een aantal uitdagende problemen gepresenteerd, die voor de betreffende bedrijven van groot technisch en financieel belang zijn. Het vertalen van deze problemen uit de industrie naar relevante wetenschappelijke onderzoeksprogramma's is de grootste uitdaging waar wij hier aan de universiteit voor staan.

In mijn leerstoel richt ik mij op drie onderzoeksonderwerpen. Deze onderwerpen hebben overduidelijk raakvlakken met het drieluik van onderwerpen op het mini-symposium van vanmiddag.

De onderzoeksonderwerpen zijn

- Akoestische holografie
- Actieve structureel-akoestische beheersing
- Banden en geluid

Op het gebied van akoestische holografie heb ik een ruime industriële ervaring bij Philips CFT verworven. Ook op het gebied van actieve structureel-akoestische beheersing zijn we de laatste jaren 'actief' bij Philips CFT. Banden en geluid is een nieuw onderwerp voor mij, waarmee ik geen industriële ervaring heb. Met de recente oprichting van de Master track 'automotive engineering science' binnen de faculteit Werktuigbouwkunde deed zich de kans voor om het onderwerp banden en geluid aan de groep 'Acoustics and noise control' toe te voegen. Het onderwerp heeft mijn warme interesse, niet in de laatste plaats omdat het een groot maatschappelijk probleem vormt. Bovendien zie ik het onderwerp banden en geluid als een verbreding van mijn technische horizon.

Het is duidelijk dat binnen de beperkte tijd die een deeltijd aanstelling biedt, de drie onderwerpen niet gelijktijdig opgestart kunnen worden. Dit houdt dan ook in dat ik de eerste jaren een keuze moet maken. Voor akoestische holografie is inmiddels een voorstel ingediend bij de Stichting Technische Wetenschappen (STW). Ik hoop binnenkort ook voor de andere twee onderwerpen een onderzoeksprogramma te kunnen starten, zodra de tijd dat toelaat. Ik zal nu nader ingaan op de drie onderwerpen van mijn leerstoel. Als eerste het onderwerp akoestische holografie.

Zoals ik in mijn inleiding al aangaf is de naam van mijn leerstoel 'Akoestiek en lawaaibeheersing'. Akoestiek is de wetenschap van de opwekking, voortplanting en waarneming van geluid. Voor de beheersing van geluid is begrip van de akoestiek vereist. Helaas zijn in complexe producten de geluidsbronnen en/of hun transmissiepaden vaak niet of niet voldoende nauwkeurig bekend. Er is dus een diagnostisch gereedschap nodig om de bronlocatie en bronsterkte vast te stellen. Er is een aantal technieken beschikbaar om bronnen te lokaliseren dan wel te karakteriseren. In het collegedictaat van mijn collega professor Verheij wordt hier uitvoerig aandacht aan besteed [3]. Zonder uitputtend te willen zijn noem ik intensiteitsmetingen, signatuuranalyse, coherentieanalyse, tijdsvensteranalyse en overdrachtsanalyse. In deze lijst past zonder meer ook een techniek die de laatste jaren volop in ontwikkeling is, namelijk akoestische holografie.

Van de genoemde technieken is akoestische holografie het meest nauwkeurig voor het lokaliseren van geluidsbronnen aan het oppervlak van een geluidsafstralend lichaam. Akoestische holografie is echter ook een gecompliceerde en dure techniek. Het vakgebied akoestische holografie kent een aantal zeer interessante academische, maar ook industrieel relevante uitdagingen. Ook vanuit mijn eigen Philips CFT werkomgeving ervaar ik de behoefte aan een aantal specifieke uitbreidingen in de akoestische holografie. Om die redenen zal ik mij in mijn onderzoek op akoestische holografie richten. Echter, alvorens in te gaan op deze uitdagingen zal ik eerst een korte uitleg geven van wat de techniek inhoudt.

Akoestische holografie, of meer precies 'nearfield acoustic holography', is in de jaren '80 ontwikkeld door Williams en Maynard [4,5]. Bij akoestische holografie wordt langs een tweedimensionaal (gekromd of recht) vlak een akoestische opname verricht, waarmee men in staat is om het volledige akoestische veld in drie dimensies terug te reconstrueren. Dit komt ook tot uiting in de naam holografie die afkomstig is uit het Grieks, en is opgebouwd uit de woorden 'holos' dat 'geheel' betekent en

het woord 'gramma' dat 'bericht' betekent. Met een hologram wordt dus feitelijk een driedimensionale reconstructie bedoeld, hetgeen zowel van toepassing is op optische holografie als op akoestische holografie.

Zoals gezegd is akoestische holografie een techniek die het volledige driedimensionale akoestische beeld reconstrueert uit het gemeten tweedimensionale akoestische veld. Dit is echter een gecompliceerde taak. Akoestische holografie is een zogenaamde inverse techniek. In deze context betekent 'invers' dat uit een bekend gevolg, de gemeten geluidssignalen, de onbekende oorzaak, de geluidsbronnen, worden gereconstrueerd. Deze reconstructie vereist een numerieke inversie van het geluidsvoortplantingsfenomeen. Dergelijke problemen zijn in het algemeen numeriek moeilijk oplosbaar, in technisch jargon aangeduid met 'slecht geconditioneerd'.

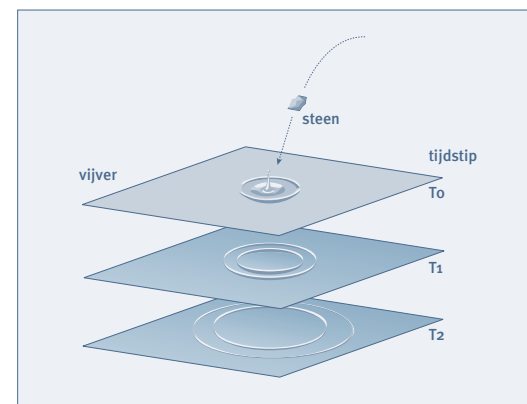
Ik wil de basisprincipes van akoestische holografie en het probleem van de slechte conditionering illustreren met een alledaags voorbeeld uit mijn achtertuin, nl. mijn vijver. Neem in uw gedachte een vijver op een windstille dag. In deze rimpelloze vijver wordt een steen gegooid. U ziet nu een patroon van golven in het water ontstaan die, vanuit het punt waar de steen in het water is gevallen, cirkelvormig uitdijen. Eenieder kan, uitgaande van het rimpelpatroon binnen enkele seconden na de plons, de plek aanwijzen waar de steen in de vijver is gevallen, zonder dat men daadwerkelijk de steen in de vijver heeft zien vallen. Echter, tijdens een regenachtige dag zal dit veel moeilijker zijn. De regendruppels vormen een ruisachtige stoorbron, die de reconstructie zeer veel lastiger maakt. Een kleine verstoring kan grote gevolgen hebben voor het correct aanwijzen van de plek waar de steen in het water is gevallen. Dit is typerend voor inverse, slecht geconditioneerde problemen.

Laten we het vijvervoorbeeld nader beschouwen. Op een zeker moment  $T_0$  wordt er een steen in de vijver gegooid, zoals in figuur 1 schematisch is aangegeven. Laten we ervan uitgaan dat gedurende een periode  $[T_1, T_2]$  nádat de steen in de vijver viel de snelheid, richting en amplitude van de oppervlaktegolven worden gemeten. De oppervlaktegolf breidt zich uit en neemt in amplitude af, zoals schematisch weergegeven in figuur 1. Met deze informatie, en de bewegingsvergelijkingen van oppervlaktegolven in water, kan worden uitgerekend waar de golf op

eerdere momenten in de tijd was. Dit gebeurt voor elke locatie waar de golven gemeten zijn. Wanneer er overzichtsplaatjes gemaakt worden waar de golven zich op de tijdstippen tussen  $T_1$  en  $T_2$  bevonden, kunt u zich voorstellen dat de plaatjes een steeds kleinere cirkel zullen vormen rond het punt waar de steen in de vijver viel, naarmate het getoonde tijdstip dichterbij  $T_0$  ligt. Aangezien het tijdstip  $T_0$  buiten de meettijd ligt, zal er geëxtrapoleerd moeten worden om de locatie van de golven tussen  $T_0$  en  $T_1$  te bepalen. Het principe van 'terug reconstrueren' wordt nu ook duidelijk; uit de gemeten golfcirkels tussen de tijdstippen  $T_1$  en  $T_2$  wordt berekend (lees: gereconstrueerd) wat de golfcirkels op eerdere tijdstippen tussen  $T_0$  en  $T_1$  waren.

figuur 1

De uitbreiding van oppervlaktegolven in een vijver

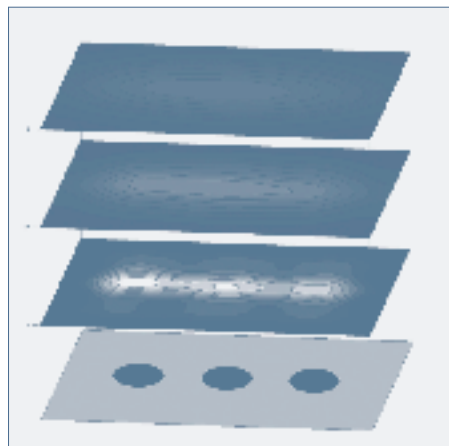


In de akoestische holografietechniek wordt het geluid dichtbij het product gemeten gedurende een zekere periode. Dit gebeurt op een aantal locaties zeer dicht bij het oppervlak van het product. Er zijn rekenmodellen beschikbaar die de voortplanting van het geluid door het medium lucht beschrijven. Gebruikmakend van een rekenmodel van het voorwerp en de lucht die het product omgeeft, wordt teruggerekend tot op het geluidsafstralende oppervlak van het product, om zodoende de locatie en sterkte van de geluidsbronnen te achterhalen. Ruis in de gemeten geluidssignalen kan grote fouten in de gereconstrueerde geluidsbron opleveren, analoog aan het effect van regendruppels in het vijvervoorbeeld.

Twee aspecten van ‘nearfield acoustic holography’ moet ik hier expliciet noemen. Allereerst is het essentieel om de zogenaamde nabijheidsgolven of in vakjargon ‘evanescent waves’ in de metingen mee te nemen. Kennis over de nabijheidsgolven bepaalt in hoge mate de ruimtelijke precisie (in vakjargon: spatiële resolutie) van het hologram, en daarmee het vermogen om verschillende geluidsbronnen te kunnen onderscheiden. De amplitude van deze nabijheidsgolven neemt echter zeer snel af naarmate de afstand tot de bron toeneemt. Dit type golven kan alleen dicht nabij de bron waargenomen worden. Om die reden moet er dus dicht tot zeer dicht bij het oppervlak van het apparaat gemeten worden. Dit wordt duidelijk in het voorbeeld waarbij in een vlakke plaat drie gaatjes zijn aangebracht op een rechte lijn. Elk gaatje heeft een diameter van 2 mm. Hun onderlinge afstand is 0,5 mm. Achter de plaat is een luidspreker opgesteld, zodanig dat uit elk gaatje een identiek geluidssignaal komt. De geluidsdrukken zijn gemeten in een vlak zeer dicht nabij de plaat, op slechts 3 mm afstand. Desondanks zijn de drie afzonderlijke gaatjes niet herkenbaar als drie separate bronnen, zoals te zien in het bovenste deel van figuur 2. Toch zit deze informatie verborgen in de meetdata. Reconstructie van het geluidsveld dichterbij de plaat levert het beeld op zoals getoond in de onderste delen van figuur 2. Met een meting op grotere afstand, zonder nabijheidsgolven, zou dit niet mogelijk zijn geweest.

figuur 2

Reconstructie van het geluidsveld voor een plaat met drie bronnen [6]



Op de tweede plaats moet ik benadrukken dat de locatie van de geluidsbron op het oppervlak van het bemeten apparaat vastgesteld wordt. Dit is niet noodzakelijkerwijs de echte geluidsbron. Bij de meeste apparaten bevindt de echte bron zich in het inwendige van apparaat. Met ‘nearfield acoustic holography’ zijn we slechts in staat het gevolg van de bron waar te nemen, namelijk de geluidsafstraling aan het oppervlak van het apparaat. Desalniettemin is de techniek van groot belang bij bijvoorbeeld lawaai bestrijding, omdat de techniek de akoestisch ingenieur de benodigde informatie verschaft om op een efficiënte wijze geluidsreducerende maatregelen te nemen.

figuur 3

Akoestische holografie toegepast op de elektronica van een TFT paneel



Philips CFT is een van de weinige bedrijven die akoestische nearfield holografie toepast op kleine producten. Een recent voorbeeld hiervan is het onderzoek aan een TFT-paneel met bijbehorende elektronica. Er was een storend piep-geluid aanwezig, waarvan de oorzaak onbekend was. In het bovenste deel van figuur 3 ziet u twee aanzichten van een TFT paneel, dat o.a. als display in mobiele telefoons wordt toegepast. Uit onderzoek bleek niet het TFT-paneel zelf geluid te produceren, maar de elektronica. Slechts één enkele component van de elektronica was





verantwoordelijk voor het piepende geluid. Met behulp van akoestische holografie is er vastgesteld welke elektronische component het geluid veroorzaakt. In het onderste deel van figuur 3 is een detailfoto van de elektronica en van de akoestische intensiteit van de geluidsbron weergegeven, als ware het een akoestische foto, gemaakt met een 'akoestische camera'. U ziet dat de titel van mijn introerede 'Geluid in beeld' hier letterlijk genomen moet worden. In de foto is het gebied met de hoogste geluidsintensiteit aangeduid met een rechthoek. In deze rechthoek bevindt zich een elektronische condensator met een afmeting van 2,5 x 3,5 mm. Deze afmeting komt overeen met ongeveer één tiende ( $1/10$ ) deel van de vrije akoestische golflengte bij de betreffende frequentie van 14000 Hz. De gehaalde spatiële nauwkeurigheid in dit voorbeeld is hoog. We zijn echter in staat om nóg hogere resoluties te halen. Voor de metingen die eerder behandeld zijn in figuur 2 is een spatiële nauwkeurigheid van één honderdste ( $1/100$ ) deel van de vrije akoestische golflengte bereikt [6].

In diverse takken van de industrie wordt de akoestische holografie als diagnostische techniek toegepast. Ik noemde u zojuist al het TFT-paneel van Philips. In de automotive industrie gebruikt DAF Trucks akoestische holografie om bijvoorbeeld de geluidsbronnen in truckmotoren onder diverse bedrijfsomstandigheden te analyseren. De automotive industrie heeft enerzijds te maken met de nationale en Europese regelgeving ten aanzien van geluidsoverlast, en anderzijds met marketingtechnische redenen om de (vracht)auto zo stil mogelijk te laten zijn. Dit heeft met name te maken met de bevoorrading in stedelijke gebieden in de avonden. Echter, de ontwikkel- en productiekosten van een stillere vrachtwagen dienen beperkt te blijven. Derhalve zijn producenten op zoek naar kosteneffectieve oplossingen om het geluid te reduceren. Bronlokalisatie middels akoestische holografie kan daar een bijdrage aan leveren.

Er zijn diverse commerciële pakketten voor akoestische holografie beschikbaar die elk hun sterke en zwakke punten hebben, en meestal ook hun specifieke toepassingsgebied. Er is behoefte aan de combinatie van een aantal specifieke karakteristieken in één akoestische holografieapplicatie die in vrijwel elke situatie te gebruiken is. Zoals uit de voorbeelden bleek zijn we nu reeds in staat om een hoge spatiële resolutie te halen in het geval van één enkele bron, of van enkele

synchrone bronnen. De uitdaging waar we nu voor staan, is het bereiken van hoge spatiële nauwkeurigheid wanneer er meerdere ongekoppelde of deels gekoppelde geluidsbronnen aanwezig zijn.

In het geval van niet-stationaire bronnen die in de tijd gezien in sterkte variëren, of die zich verplaatsen over het oppervlak, willen we ook over een voldoende spatiële nauwkeurigheid bij meerdere bronnen kunnen beschikken. Daarbovenop is het wenselijk om te beschikken over compensatietechnieken voor omgevingsgeluid in de metingen, zodat het gebruik van een speciale meetkamer overbodig wordt. Als bovendien de kosten voor aanschaf en gebruik van akoestische holografie verlaagd kunnen worden, zal dit het gebruik van akoestische holografie sterk stimuleren. Om tot de beschreven akoestische holografie-applicatie te komen is in samenwerking met Universiteit Twente door mij een voorstel ingediend bij de Stichting Technische Wetenschappen (STW). Na goedkeuring van het STW-project zal door drie promovendi aan de genoemde aspecten gewerkt worden.

Dan kom ik nu toe aan mijn tweede onderwerp, actieve structureel-akoestische beheersing.

# Actieve structureel-akoestische beheersing

Tot nu toe heb ik in deze rede vooral aandacht geschonken aan geluid in lucht, met name aan de bronlokalisatie van deze geluiden. Geluid of lawaai wordt in de praktijk veroorzaakt door bijvoorbeeld machines, consumentenelektronica of gebruiksvoorwerpen. Deze apparaten, of onderdelen ervan, trillen. Deze zogenaamde structuurtrillingen brengen de lucht rondom het apparaat in trilling, en veroorzaken zodoende afgestraald geluid. Dit is in grote lijnen het onderwerp van het vakgebied structuur-akoestiek. Het vakgebied is een combinatie van de dynamica, de leer van trillende voorwerpen, en van de akoestiek, de leer van geluidsofopwekking, voortplanting en waarneming van geluid. In dit vakgebied is het meestal de bedoeling om het afgestraalde geluid van machines of gebruiksvoorwerpen te reduceren door het reduceren van de geluidsafstralende structuurtrillingen. Een goed voorbeeld hiervan is de geluidsproblematiek bij een MRI-scanner, zoals weergegeven in figuur 4. Deze machine maakt gebruik van magnetische velden om in het lichaam van een patiënt te kunnen kijken. Tijdens het zogenaamde scannen ontstaat een zeer sterk, ongewenst geluid. Het verminderen van dit ongewenste geluid is onderdeel van het structuur-akoestiek onderzoek bij Philips Medical Systems. Een impressie van een van de geluidsafstralende locaties van een MRI-scanner ziet u in figuur 5.

figuur 4

Philips Achieva MRI scanner



Een geluidsafstralend vlak van een MRI scanner



figuur 5

In voorkomende gevallen wordt ook het omgekeerde probleem aangepakt: het reduceren van structuurtrillingen in machines die in trilling gebracht worden door geluid in hun omgeving, zoals een waferstepper of een elektronenmicroscop. Het omgevingsgeluid brengt de machine in trilling, met als gevolg een verminderde machineprestatie.

Het reduceren van structuurtrillingen kan op twee manieren gebeuren, door gebruik van actieve of passieve maatregelen. Passieve maatregelen zijn grofweg onder te verdelen in de dempende (dissiperende) en isolerende (reflecterende) maatregelen, en in maatregelen die de impedantie of de massa-stijfheidsverdeling in de constructie veranderen. Dit laatste is een kwestie van slim construeren. Een compleet overzicht van alle beschikbare passieve maatregelen is te vinden in het collegedictaat 'Geluidarm construeren' van mijn collega professor Verheij [3] als ook in de werken van Cremer en Heckl [7].

Bij actieve beheersing wordt een structuur uitgerust met een combinatie van sensoren, actuatoren en een regelsysteem. Middels een of meerdere sensoren wordt het geluid of de trilling gemeten. Gebaseerd op de gemeten waarden, en in sommige gevallen tevens op een model van de structuurdynamica, stuurt het regelsysteem de actuatoren aan om het geluid of de trilling tegen te gaan. Bij actieve systemen hebben we dus tenminste te maken met een sensor die meet, een regelsysteem dat regelt en een actuator die actueert. Er zijn drie verschillende categorieën

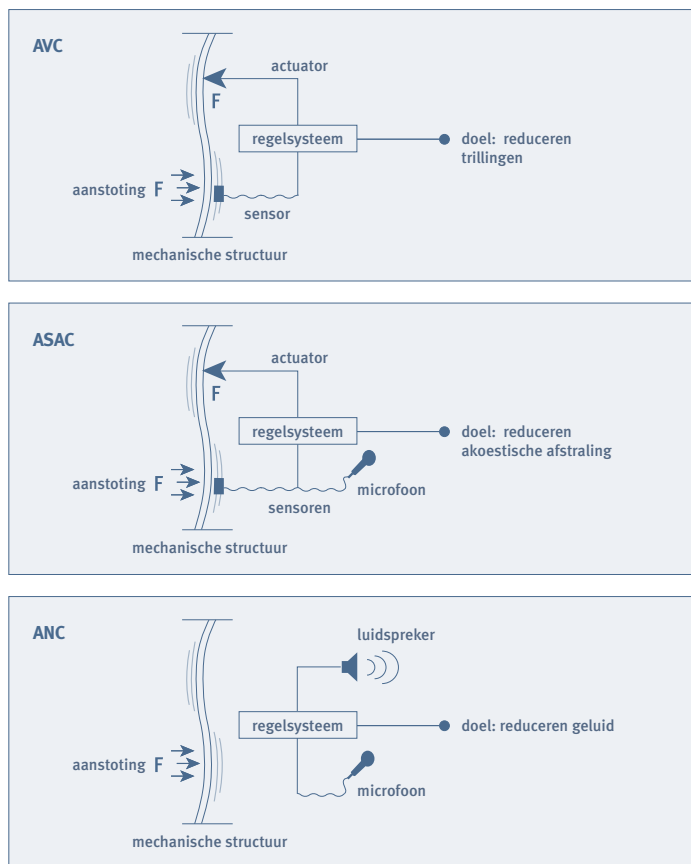


van actieve maatregelen of beheersing te onderscheiden. De eerste categorie is *actieve trillingsbeheersing*, in het Engels 'Active Vibration Control' (AVC).

De doelstelling ervan is het verminderen van de structuurtrilling. Het regelsysteem ontvangt informatie over de trillingen van de structuur van een sensor die aan de structuur is bevestigd. Met deze informatie stuurt het regelsysteem een actuator aan die de trilling van de structuur tegengaat, zoals weergegeven in figuur 6a.

figuur 6

Principes van actieve beheersing,  
a) actieve trillingsbeheersing (AVC)  
b) actieve structureel-akoestische beheersing (ASAC)  
c) actieve geluidsbeheersing (ANC)



De tweede categorie is *actieve structureel-akoestische beheersing*, in het Engels 'Active Structural Acoustic Control' (ASAC). Daarbij ligt de nadruk op het verminderen van de geluidsafstraling door het beheersen van specifieke structuurtrillingen die geluid afstralen. Net zoals bij AVC worden actuatoren aangestuurd die op de structuur aangrijpen, terwijl de sensoren een combinatie kunnen zijn van akoestische en structurele sensoren, zoals weergegeven in figuur 6b. Het is mogelijk om actieve structureel-akoestische beheersing selectief toe te passen en alleen die structuurtrillingen te reduceren die de meest hinderlijke of sterkste tonen in het afgestraalde geluid veroorzaken. Essentieel is de modelvorming van de relatie tussen de trillingen van de structuur en het afgestraalde geluid.

De derde categorie is de *actieve geluidsbeheersing*, in het Engels 'Active Noise Control' (ANC). Daarbij ligt de nadruk op het reduceren of beheersen van de geluidsvelden door toepassing van actuatoren en sensoren in het akoestische domein, zoals luidsprekers en microfoons, zie figuur 6c. In deze categorie worden geen sensoren of actuatoren toegepast die de trillingen van de structuur bemeten of krachten direct op de structuur uitoefenen. Deze categorie is algemeen bekend onder de naam 'anti-geluid'. Mijn interesse gaat uit naar de eerste twee categorieën, met de nadruk op actieve structureel-akoestische beheersing. Binnen de leerstoel zal ik mij *niet* bezig houden met anti-geluid.

Van de twee categorieën waar ik mij op wil richten geef ik u een voorbeeld uit de literatuur. Als eerste een illustratief voorbeeld van actieve trillingsbeheersing (AVC). Het betreft een tennisracket, weergegeven in figuur 7, ontwikkeld door de firma Head [8]. Bij gebruik van dit tennisracket wordt een sterkere retourslag mogelijk bij een bepaalde zwaaisnelheid. Bovendien vermindert het risico op een tenniselleboog. In een tennisracket wordt een buigtrilling opgewekt wanneer de bal geslagen wordt. Deze buigtrilling bij circa 200 Hz wordt extra sterk wanneer de bal bij een bijna-misslag iets te vroeg of te laat geraakt wordt en is zeer belastend voor de arm. Door het creëren van extra demping voor alleen de eerste buigtrilling van het racket wordt de retourslag sterker en wordt de arm ontlast bij een bijna-misslag zonder de verdere eigenschappen van het tennisracket te veranderen. Tennissers met een tenniselleboog oordeelden positief over het racket. De actieve

maatregelen bestaan uit piezo-composietdraden die in lengterichting van het frame zijn aangebracht. Ze dienen tegelijkertijd als sensor en actuator. Het regelsysteem, gemonteerd in de greep, stuurt de piezo-draden op een specifieke manier aan zodanig dat er een maximale energiedissipatie bereikt wordt en dus demping. Het regelsysteem in dit racket is zelfvoorzienend, omdat de regels van de tennissport geen energievoorziening in rackets toestaan, zoals batterijen. Dit tennisracket is inmiddels in massaproductie genomen.

figuur 7

Actieve trillingsbeheersing van een tennisracket van de firma Head [8]

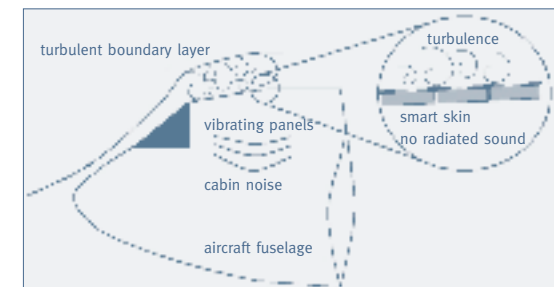


Een voorbeeld van actieve structureel-akoestische beheersing (ASAC) uit de vliegtuigbouw is het gecombineerd gebruik van passieve absorptie en actieve isolatie voor het verminderen van cockpitgeluid. De luchtstroming over de cockpit van een vliegtuig, in dit geval een Cessna Citation III, brengt door turbulentie de cockpitwand in trilling en veroorzaakt daardoor een vrij hard, breedbandig geluid in de cockpit, zie figuur 8. Een combinatie van passief schuimmateriaal en actieve piezo-folie op de cockpitwand, zoals geïllustreerd in figuur 8, zorgt voor een passieve absorptie bij hoge frequenties en een actieve isolatie bij lage frequenties [9]. Dit voorbeeld verschilt met het actieve trillingsbeheersingsvoorbeeld (AVC) in die zin dat het reduceren van het cabinegeluid de doelstelling is in plaats van het reduceren van structuurtrillingen. Toepassing van actieve structureel-akoestische beheersing voor de lagere frequenties is in dit geval voordelig, omdat het een gewichtsbesparing oplevert.

Uit de genoemde voorbeelden blijkt een aantal voordelen van actieve structurele (akoestische) beheersing in vergelijking met passieve maatregelen. Actieve beheersing is meer *flexibel*. Het regelsysteem kan reageren op wijzigingen in de akoestiek of het trilgedrag van de structuur, bijvoorbeeld als gevolg van temperatuurverschillen. Daarnaast is het met actieve methoden mogelijk om het geluid *gericht te beïnvloeden*, te beheersen. Met name de psycho-akoestische aspecten van geluid kunnen op deze manier effectief beïnvloed worden. Daarnaast kan actieve beheersing *selectief* ingezet worden. Uit het voorbeeld uit de sportindustrie bleek dat actieve beheersing toegepast kan worden op enkele specifieke trillingsvormen die een probleem vormen. Actieve beheersing levert een *additionele* eigenschap. Actieve beheersing kan gebruikt worden om bijvoorbeeld de demping (van specifieke trillingen) te verhogen, terwijl de intrinsieke mechanische eigenschappen, zoals stijfheid en resonantiefrequenties, van het systeem nagenoeg onveranderd blijven. Ik verwijs hier opnieuw naar het voorbeeld uit de sportindustrie.

figuur 8

Gecombineerde passieve en actieve lawaai-beheersing in een Cessna Citation III vliegtuig [9]



Twee andere belangrijke voordelen zijn het *geringere gewicht en afmetingen*. Gebruik van actieve beheersing staat lichtere constructies toe, hetgeen in de vervoerssector tot lagere operationele kosten leidt en in de mechatronica tot betere prestaties.

Op het gebied van actieve structureel-akoestische beheersing, waar mijn interesse naar uitgaat, wordt al lang gewerkt. Toch zijn er slechts spaarzaam toepassingen te vinden in de praktijk. Hiervoor zijn geen



technische, maar wel drie sociaal-commerciële redenen aan te voeren [10].

Op de eerste plaats is er sprake van een *waarderingsprobleem*. In de huidige introductiefase zijn actieve structureel-akoestische beheersingssystemen nog aanmerkelijk duurder dan traditionele geluidsbeheersingstechnieken. Ondanks de technische voordelen hebben consumenten geluidsaspecten nog niet dusdanig ‘in beeld’ dat ze bereid zijn er meer voor te betalen, hetgeen men wel voor bijvoorbeeld platte televisie doet. De reden hiervoor is dat geluid ‘ongrijpbaar’ is. Mensen hebben geen referentiekader voor het niveau van geluid. Daardoor is geluid moeilijk te kwantificeren. Bovendien ligt het buiten de invloedssfeer van consumenten. Er is dus geen, of te weinig, sprake van een ‘market pull’.

Op de tweede plaats is er een *cultuuromschakeling* nodig in het ontwerpproces, waar geluidsaspecten traditioneel niet meegenomen worden in een geïntegreerde systeemaanpak. Nog te vaak is akoestiek en lawaai-beheersing het sluitstuk in een ontwerp, of moet achteraf tot een acceptabel niveau teruggebracht worden. In mijn vakgebied luidt de gouden stelregel dat het structuurgeluidsontwerp een integraal onderdeel van het gehele ontwerpproces moet zijn. Ook zijn de ruimere mogelijkheden van geluidsbeheersing ten aanzien van het selectief beïnvloeden van het geluidsspectrum door actieve maatregelen in plaats van het reduceren van geluidsniveaus door passieve maatregelen nog niet voor iedere akoestisch ingenieur evident. Er is geen, of te weinig, sprake van ‘technology push’.

Op de derde plaats zijn er *infrastructurele bezwaren* om actieve structureel-akoestische beheersing in te voeren. Productiepersoneel moet opgeleid worden en productiesystemen moeten aangepast worden. Invoering van actieve maatregelen is mede daardoor kostenverhogend.

Het hele complex van factoren belet de uitgebreide invoering van actieve structureel-akoestische beheersingsystemen. Uit eigen ervaring weet ik dat deze niet-technische aspecten de invoering van actieve oplossingen bemoeilijken. Op de universiteit zal ik hoofdzakelijk de technische aspecten van actieve structureel-akoestische beheersing kunnen adresseren. We moeten echter onze ogen niet sluiten voor de genoemde sociaal-commerciële belemmeringen.

Uit de schaarse praktijkvoorbeelden blijkt dat de toepassing van actieve geluidsbeheersing voor de lagere frequenties en passieve maatregelen voor de hogere frequenties een effectieve combinatie is. Hierbij wordt voor de actieve structureel-akoestische beheersing veelal gebruik gemaakt van een beperkt aantal actuatoren en sensoren. Dit is mijns inziens geen limitatie van de techniek, maar een keuze om de kosten en de complexiteit van de actieve structureel-akoestische beheersing te beperken. De hoogste frequentie waarbij actieve structureel-akoestische beheersing met slechts enkele actuatoren en sensoren bedreven kan worden, wordt bepaald door de constructie in kwestie. De afmetingen en de massa- en stijfheidsverdeling van de constructie bepalen de eigenfrequenties en de modale dichtheid. In het algemeen kan gesteld worden dat met een gering aantal actuatoren alleen constructies met geringe modale dichtheid, en dus lage frequenties, beheerst kunnen worden. Mijn interesse gaat uit naar het toepassen van actieve structureel-akoestische beheersing voor frequenties die hoger zijn dan gebruikelijk. Ik denk hierbij aan het plaatsen van een groot aantal actuatoren over een relatief groot oppervlak van de te beheersen structuur, of de toepassing van actuatoren ‘per strekkende meter’, zoals piezo-folies. We spreken dan van zogenaamde ‘gedistribueerde actieve structureel-akoestische beheersing’. De voortschrijdende miniaturisering van actuatoren en sensoren en de mogelijkheid om grote aantallen actuatoren, sensoren en elektronica in de structuur te integreren zal instrumenteel blijken voor gedistribueerde actieve structureel-akoestische beheersing.

Ik ben er van overtuigd dat de grens waarboven actieve structureel-akoestische beheersing minder geschikt is, een grens is die in de loop der jaren zal verschuiven. Het is mijn intentie om deze grens te verkennen en te helpen verschuiven.

# Banden en geluid

Als laatste kom ik toe aan het onderwerp banden en geluid.

In onze samenleving met een zeer hoge autodichtheid in drukbevolkte gebieden is het geluid veroorzaakt door auto's maatschappelijk zeer ongewenst. In de centra van steden wordt het verkeerslawaaï vooral gedomineerd door het optrekken en afremmen van auto's. Hierbij is met name het motorgeluid de grootste geluidsbron. Buiten de stadscentra en op doorgaande wegen wordt de geluidsoverlast door auto's vooral gekenmerkt door de bandgeluiden. Bij snelheden vanaf 30 á 50 km/uur is het bandgeluid dominant [11].

In de laatste 20 jaar was de toename van het wegverkeer zeer sterk. Er werden nieuwe wegen aangelegd en wegen werden verbreed. De toename van de geluidsoverlast hield gelijke tred met de toename van het wegverkeer. De meest gebruikte geluidsmaatregelen, de geluidsschermen en woningisolatie, zijn duur en onvoldoende effectief gebleken omdat de verkeerstoename groter was dan verwacht. Het gebruik van ZOAB (zeer open asfalt beton) op de snelwegen reduceert het bandgeluid merkbaar. Ook onder het huidige kabinet wordt er aan de verdere uitbreiding van het wegennet gewerkt. Inmiddels komt het onderwerp bandgeluid in het kader van geluidsoverlast door verkeer langzamerhand op de politieke agenda. Recent heeft staatssecretaris Van Geel van Milieu voorgesteld om de Europese geluidsnormen flink aan te scherpen. Opmerkelijk is dat hij dit denkt te bereiken door het aanpassen van de autobanden. Volgens Van Geel is het aanpakken bij de bron efficiënter dan het plaatsen van geluidsschermen en isolatiemaatregelen in woningen.

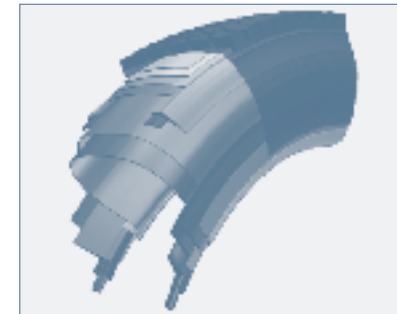
In mijn leerstoel zal ik onderzoek doen naar bandgeluid. Als inleiding hierop zal ik eerst de structuur van banden en een aantal fysische fenomenen die een rol spelen bij het ontstaan van bandgeluid toelichten.

Banden vormen een product dat al zeer lang bestaat. In de loop van de tijd is het geëvolueerd tot een zeer complex product. In figuur 9 is de opbouw van een vrachtwagenband te zien. De band is opgebouwd uit

een zeer groot aantal lagen uiteenlopende materialen, met overwegend niet-lineair, richtingsafhankelijk en/of temperatuursafhankelijk materiaalgedrag. Het loopvlak is gekenmerkt door een onregelmatig patroon van kanaaltjes en putjes, het zogenaamde profiel. Het profiel van de band speelt een uitermate belangrijke rol bij de geluidproductie. Ik zal hier later in mijn rede nog op terugkomen.

figuur 9

Opbouw van een band voor een lichte vrachtwagen [12]



Bij het ontstaan van bandgeluid speelt een aantal fysische fenomenen een rol. Enerzijds worden bandtrillingen gegenereerd, die op hun beurt weer geluid afstralen. Anderzijds leidt de interactie tussen mechanische vervormingen en omgevingslucht rechtstreeks tot geluid. Ik zal nu beide categorieën toelichten.

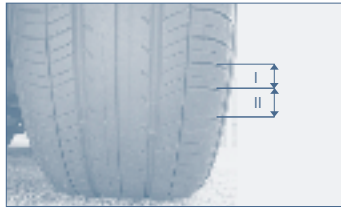
De eerste bron voor bandgeluid zijn de bandtrillingen. Het gewicht van de auto veroorzaakt door de zwaartekracht een indrukking van de band ter plekke van het band-wegdek contactpunt. Deze contactpuntindrukking op de band verplaatst zich over de band tijdens het rijden en exciteert daarmee trillingen in de band. Tijdens het rollen van de band over het wegdek exciteren ook de wegdekoneffenheden trillingen in de band. Daarnaast vormt het profiel op de band zelf een soort 'ingebouwde wegdekruwheid' die ook trillingen in de band veroorzaakt.

Met het oog op geluid is het profiel in de omtreksrichting van de band met opzet onregelmatig gekozen. Een dergelijk onregelmatig patroon zorgt ervoor dat het geluid dat door het profiel wordt veroorzaakt verdeeld is over een groot aantal frequenties. Een dergelijk breedbandig

figuur 10

geluid klinkt minder irritant dan het geluid dat ontstaat bij een regelmatig profiel, waarbij pure tonen het geluidsspectrum domineren.

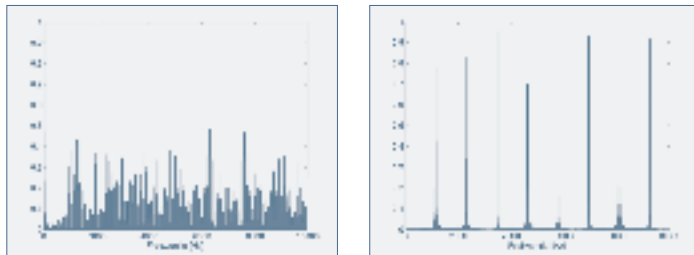
Onregelmatigheid van  
brandprofiel in  
omtreksrichting



Ter illustratie van dit fenomeen, heb ik het bandprofiel van mijn eigen auto nader onder de loep genomen. In figuur 10 ziet u een foto van het profiel van mijn autoband. Op het eerste oog ziet u er misschien niets bijzonders aan. Echter, de profielsteek die in de figuur aangegeven is met een 'I' is veel kleiner dan de profielsteek die is aangegeven met een 'II'. Deze onregelmatigheid in het profiel zorgt voor een breedbandig geluidsspectrum zoals weergegeven in het linker deel van figuur 11. Indien de profielsteek constant zou zijn geweest, dan verkrijgen we een zuiver tonaal spectrum, zoals weergegeven in het rechter deel van figuur 11. Een dergelijk geluid wordt als meer irritant ervaren dan een breedbandig geluidsspectrum dat ontstaat bij een onregelmatig profiel. Om die reden wordt het profiel onregelmatig gemaakt.

figuur 11

Geluidsspectrum van  
een onregelmatig  
bandprofiel (links)  
en een regelmatig  
bandprofiel (rechts)

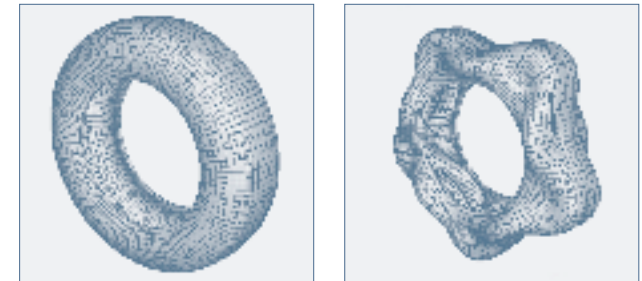


Duidelijk is dat het profiel, maar ook het wegdek, de band in mechanische zin exciteert. Deze mechanische excitatie resulteert in een mechanische response van de band. De modellering van deze

mechanische response is op dit moment onderwerp van studie aan deze universiteit. In de linker helft van figuur 12 is een model van een band weergegeven en in de rechter helft van deze figuur is een berekende bandtrilling weergegeven. De berekeningen zijn uitgevoerd door Ron Blom, een student aan deze universiteit. In de figuur zijn de trilniveaus overdreven weergegeven; in werkelijkheid zijn de trilniveaus in de orde van micrometers. Voor de getoonde trillingsvorm trilt de hele band. U kunt zich voorstellen dat deze trilling geluid afstraalt.

figuur 12

Numeriek model van  
een autoband (links)  
en een berekende  
bandtrilling (rechts)



De tweede bron van bandgeluid is de interactie tussen bandvormingen en omgevingslucht. Het fenomeen 'air-pumping' treedt op in de directe nabijheid van het band-wegdek contactpunt. Dit is een aero-akoestisch fenomeen. Tijdens het rollen van de band wordt lucht weggeperst uit het profiel bij het naderen van het band-wegdekcontactpunt en wordt er weer lucht aangezogen in het profiel na het passeren van het band-wegdek contactpunt. De luchtstromingen in het bandprofiel die hierdoor ontstaan veroorzaken bandgeluid.

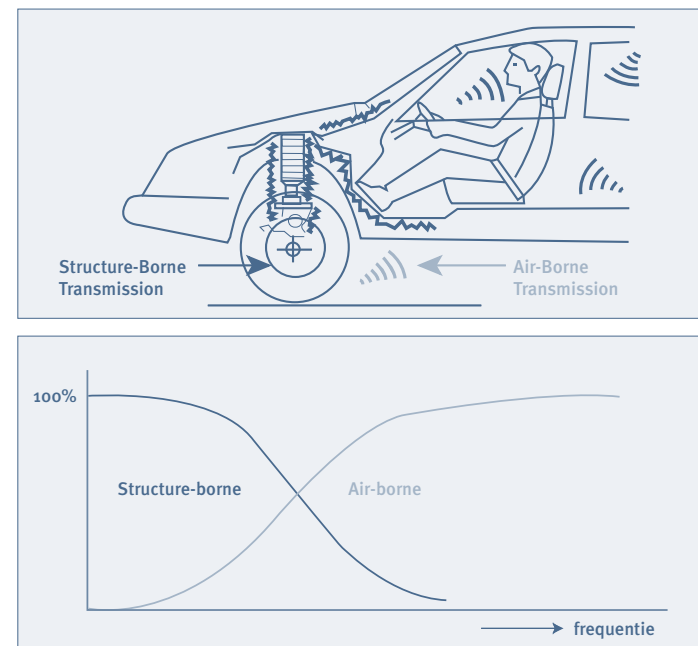
Voor zowel de mechanisch geïnduceerde trillingsbronnen als voor de aero-akoestische bronnen geldt, dat niet elke bron evenveel geluid produceert. De hoeveelheid energie die wordt omgezet in geluidsenergie is afhankelijk van de geluidsafstralings efficiëntie. Voor bandengeluid is met name het 'Hoorneffect' van belang. In het muziekinstrument hoorn gaat de doorsnede zeer geleidelijk van klein naar groot. De hoorn versterkt het geluid enorm. Bij een band treedt een vergelijkbaar fenomeen op.

Het wegdek en het loopvlak van de band hebben een hoge impedantie in vergelijking met lucht (net als de metalen wand van de hoorn), en vormen samen een toeter (net als de hoorn). De sterkste trillingen ontstaan bovendien in de buurt van het contactpunt band-wegdek. Het gevolg hiervan is dat het geluid dat nabij het oppervlak van de band ontstaat (dus in het ‘mondstuk van de hoorn’) zeer efficiënt versterkt wordt naar de omgeving van de band. De efficiëntie van de versterking wordt bepaald door de mate waarin de oppervlakken van bandloopvlak en wegdek het geluid reflecteren. Het wegdek van ZOAB reflecteert het geluid minder goed. Hierdoor ontstaat een akoestisch minder goed gedefinieerde hoorn, en daardoor een minder sterk hoorneffect. Het reduceren van bandgeluid zal bewerkstelligd moeten worden door vanuit de twee mogelijke invalshoeken te werken. De eerste is het verminderen van het hoorneffect door aanpassingen aan het wegdek. Aan dit onderwerp wordt veel aandacht besteed. Er is ook al veel bereikt op dit terrein. De tweede invalshoek is het reduceren van de opwekking van geluid door de band zelf. Naar mijn mening wordt er nog te weinig gewerkt aan aanpassingen van de band. Hier lijken nog significante reducties van bandgeluid haalbaar te zijn.

### Interieur bandgeluid

Geluidscomfort in de auto is zeer belangrijk voor de gebruiker en daardoor een belangrijk marketingaspect in de verkoop van auto's. In moderne personenauto's is bandgeluid de belangrijkste bron van ongewenst interieurgeluid. In de huidige praktijk wordt zelfs de bandkeuze afgestemd op de specifieke eigenschappen van de nieuw ontworpen auto, met het oog op een aangenaam interieurgeluid.

Bandgeluid bereikt op twee manieren de passagiers, zoals aangegeven in figuur 13. Enerzijds wordt bandgeluid via het structurele overdrachtspad overgebracht. Dat wil zeggen, de bandtrilling wordt via wielophanging en carrosserie doorgegeven aan de passagiersruimte. Dit is het dominante mechanisme voor geluidsofwekking voor de lagere frequenties. Anderzijds wordt bandgeluid via het luchtgeluidpad overgebracht, dat wil zeggen het bandgeluid exciteert de autocarrosserie rechtstreeks. Dit is het dominante mechanisme voor interieurgeluidsofwekking voor de hogere frequenties. De frequentie waarboven het luchtgeluidpad belangrijker wordt dan het structurele overdrachtspad is nog onderwerp van studie.



Bandgeluid-transmissiepaden voor het interieur geluid in een auto (uit ref. [12], met dank aan Goodyear A.S.)

figuur 13

Bandgeluid bevindt zich in de wetenschappelijke wereld nog in de diagnose- en analysefase, waarin door middel van modelvorming van het dynamisch gedrag van band en auto wordt getracht vast te stellen wat de belangrijkste invloedsparameters voor het ontstaan van bandgeluid zijn. Niet alleen het identificeren van de belangrijkste invloedsparameters is van belang, maar vooral ook het vaststellen van de interacties.

Tot op heden is er al veel onderzoek gedaan naar de modellering van de structuur-dynamica van banden voor de hogere frequenties [13]. Vanaf ongeveer 500 Hz worden quasi-2D modellen toegepast, waarbij de gekromdheid van de band en lokale fenomenen als indrukking op het contactpunt met het wegdek verwaarloosd mogen worden. Ook is er al veel onderzoek gedaan naar het modelleren van de voertuigwegligging, met name door professor Pacejka van TU Delft en door mijn collega Igo Besselink. Deze modellen zijn geldig in het laagfrequente gebied. Mijn





## Afsluiting

interesse gaat ernaar uit om aansluiting bij de voertuigwegliggingsmodellen te zoeken door mij te richten op de modellering van de structuur-dynamica van de band in het tussenliggende frequentiegebied, van pakweg 50 tot 500 Hz. In dit frequentiegebied is een driedimensionale modellering van de band essentieel, omdat de zogenaamde ringfrequentie in het gebied tot 500 Hz optreedt. De grootste uitdagingen zijn gelegen in het correct modelleren van de opbouw van de band, het maken van een correct materiaalmodel voor de rubberdelen van de band, het correct modelleren van het contactprobleem tussen band en wegdek, en natuurlijk het beperken van de omvang van de 3D-rekenmodellen.

Ook voor het modelleren van het interieur bandengeluid in een auto is een goede modellering van de band-dynamica van belang. De transmissie van de bandtrillingen via de wielophanging en het chassis naar het interieur van de auto is voor de lagere frequenties de voornaamste bron van bandengeluid. Om deze reden is een goed model van deze trillingstransmissie nodig. Dit model kan experimenteel, numeriek of een combinatie van beiden zijn. Bij de gewaarwording van interieur bandengeluid speelt de psycho-akoestiek een belangrijke rol. Niet alleen het niveau van het geluid, maar ook de verhouding van de sterkte van de diverse tonen in het geluidsspectrum spelen een belangrijke rol in het ervaren van geluidskomfort in de auto. Ik zie hier een goed aanknopingspunt voor actieve structureel-akoestische beheersing, die de mogelijkheid biedt om specifieke frequenties in een geluidsspectrum te beïnvloeden.

### Onderwijs

Het zal u opgevallen zijn dat ik het tot nu toe alleen over onderzoek gehad heb. Als deeltijd hoogleraar heb ik ook een onderwijstaak. Nu verkeer ik in de gelukkige omstandigheid dat ik van collega professor Verheij het bestaande college 'Geluidarm construeren' kan overnemen. Dit college, ik heb er al een aantal keren aan gerefereerd, gaat in het kort gezegd over 'slim' ontwerpen zodanig dat de machine die door de constructeur ontworpen wordt inherent minder geluid produceert. In de eerste jaren zal ik het college in de huidige vorm laten bestaan. Op termijn wil ik het college in een nieuw jasje steken, waarbij een aantal onderwerpen van mijn onderzoekslijn zal worden toegevoegd.

In het afgelopen uur heb ik drie, ogenschijnlijk separate, onderwerpen de revue laten passeren. Als afsluiting wil ik de onderlinge samenhang van deze drie onderwerpen toelichten.

De akoestische holografie is een diagnostisch gereedschap voor lokalisatie van geluidsbronnen aan het oppervlak. Deze informatie is belangrijk voor het efficiënt kunnen toepassen van passieve maatregelen. Dezelfde redenering gaat op voor actieve structureel-akoestische geluidsbeheersing. Inzicht in de werking van het actieve beheersingssysteem kan worden verkregen door een vergelijking van twee holografische metingen, waarbij het actieve systeem beurtelings in- en uitgeschakeld is. Actieve beheersing en akoestische holografie liggen wat dat betreft in elkaars verlengde.

Actieve beheersing en banden-en-geluid hebben mijns inziens ook duidelijke verbanden met elkaar, met name voor het interieurgeluid. In mijn rede heb ik geponeerd dat het interieurgeluid in auto's bij lage frequenties gedomineerd wordt door de structurele transmissie van bandtrillingen via de wielophanging. Dit is een groot probleem voor autofabrikanten, waarop zelfs de bandkeuze afgestemd wordt. De perceptie van geluid is hierbij een belangrijke factor. Actieve beheersing kan in de toekomst een rol gaan spelen omdat hiermee op selectieve wijze frequentiecomponenten beheerst kunnen worden, om zodoende in te spelen op het perceptieve aspect van geluid in een auto. Bovendien kan de actieve beheersing adaptief gemaakt worden om bijvoorbeeld in te haken op verandering van omstandigheden, zoals veroudering.

Het moge duidelijk zijn dat het vak 'Akoestiek en lawaai-beheersing' een zeer multi-disciplinair vakgebied is met vele dwarsverbanden. Dit vakgebied kan alleen goed gedijen in een multi-disciplinaire omgeving als de mechatronica afdeling van Philips CFT of de 'Dynamics and Control Technology' groep aan de Technische Universiteit Eindhoven. Ik hoop dan ook optimaal gebruik te kunnen maken van de aanwezige kennis in deze twee thuisbases.

Rest mij een aantal welgemeende woorden van dank uit te spreken. Professor Dick van Campen wil ik hartelijk danken voor de mogelijkheden die hij mij heeft geboden tijdens mijn studententijd. Dankzij hem, en ook dankzij Ruud Kriens, heb ik aan zowel mijn afstudeerwerk als mijn promotiewerk bij Fokker goede herinneringen. Budi Sastra wil ik bedanken voor mijn aanstelling in zijn groep op het Natuurkundig Laboratorium van Philips, terwijl ik bij mijn aanstelling toch al ouder was dan 30 jaar. Budi, bedankt. Ik dank het CFT en in het bijzonder mijn oud-groepsleider Frank Sperling en mijn oud-afdelingsleider professor Jan van Eijk voor het feit dat ik hier aan de TU/e mijn dromen als deeltijd hoogleraar werkelijkheid kan maken. Professor Henk Nijmijer dank ik voor zijn vertrouwen in mij en mijn aanstelling als deeltijd hoogleraar. Professor Jan Verheij wil ik danken voor de prettige samenwerking tijdens de colleges en 'gewoon tussendoor'. Ik heb reeds veel van Jan geleerd. Professor Henk Tijdeman bedank ik als persoonlijk inspirator. Verder bedank ik Ines en Rens voor de prettige samenwerking in de korte tijd die ik hier aan de universiteit werk. Rick Scholte bedank ik voor zijn enthousiaste manier van samenwerken. Ook bedank ik hem voor de mooie plaatjes die ik in mijn rede heb mogen gebruiken. Ten slotte wil ik mijn collega's bij Philips CFT bedanken, met name de 'akoestische groep' Alex, Martijn, David, Georgo en Theon.

Ik bedank mijn ouders voor de gelegenheid om een universitaire opleiding te volgen en voor alle aanmoediging die ik van hen ontvang en nog ontvang. Mijn schoonouders bedank ik voor hun ondersteuning van ons jonge gezin en vooral voor het regelmatig op onze kinderen passen. Mijn grote dank gaat uit naar mijn gezin. Christine en Marcel hebben mij met grote regelmaat impliciet gewezen op de belangrijke zaken in het leven, zoals geluk en gezondheid, het leren fietsen en het uitgebreid voorlezen van Duimpje bij het naar bed brengen. Mijn vrouw Petra is letterlijk en figuurlijk mijn rots in de branding. Haar relativeringsvermogen en haar inbreng als sparringpartner bij het schrijven van mijn introrede zijn onmisbaar gebleken.

Ik heb gezegd.

- 1 A.P. Dowling, J.E. Ffowcs Williams, 'Sound and Sources of Sound', Ellis Horwood Limited, Chichester, UK, 1983.
- 2 J. van Eijk, 'Mechatronics, Scheppend Samen Werken', introrede Technische Universiteit Delft, 21 februari 2001.
- 3 J.W. Verheij, 'Basiskennis Geluidarm Construeren', Collegedictaat Technische Universiteit Eindhoven, 1996.
- 4 E.G. Williams, J.D. Maynard, 'Holographic Imaging without the wavelength resolution limit', Phys. Rev. Lett., 45, 554-557, 1980.
- 5 J.D. Maynard, E.G. Williams, Y. Lee, 'Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalised holography and the development of NAH', Journal of Acoustical Society of America, Volume 78, No. 4, 1985.
- 6 R. Scholte, N.B. Roozen, 'High Resolution Near-field Acoustic Holography', 11th International Congress on Sound and Vibration, St. Petersburg, Russia, 2004.
- 7 L. Cremer, M. Heckl, E.E. Ungar, 'Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies', Berlin, Springer, 1988 (te druk: 1973).
- 8 H. Lammer, 'Einsatz adaptiver Materialien und deren Wirkungen bei Sportgeräten am Beispiel Tennisschläger I.S18 sowie Ski I.C300 der Fa HEAD Sport AG', Adaptronic Congress 2003, 1-3 april 2003.
- 9 C. Guigou, C.R. Fuller, 'Control of aircraft interior broadband noise with foam-PVDF smart skin', Journal of Sound and Vibration (1999), 220 (3), 541-557.
- 10 L.J. Eriksson, 'A brief social history of active sound control', Sound and Vibration, Volume 33, issue 7, July 1999.
- 11 U. Sandberg, 'Tyre-road noise - Myths and realities', Internoise, The Hague, 2001.
- 12 J. Leyssens, 'Akoestische ontwikkeling banden', SilentRoads symposium 27 April 2004.
- 13 K. Larsson, W. Kropp, 'A high-frequency three-dimensional tyre model based on two coupled elastic layers', Journal of Sound and Vibration (2002), 253(4), 889-908.

# Curriculum Vitae



**Prof.dr.ir. N.B. Roozen is per 1 februari 2003 benoemd als deeltijd hoogleraar 'Acoustics and noise control' aan de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e). Op 17 september 2004 spreekt hij zijn intrede uit.**

Bert Roozen (Alkmaar, 1962) studeerde werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteiten van Twente en Eindhoven. Van 1986 tot 1995 werkte hij als onderzoeksmedewerker bij Fokker Aircraft te Amsterdam. In 1992 promoveerde hij aan de TU/e op het onderwerp: numerieke gekoppelde mechanisch-akoestische analyses van vliegtuigrompen. Van 1995 tot 1998 werkte hij als wetenschappelijk medewerker aan het Philips Natuurkundig Laboratorium op het gebied van numerieke en experimentele modelvorming van geluid in consumentenelektronica. Sinds 1998 werkt hij als senior scientist akoestiek en geluidsbeheersing bij het Philips Centre for Industrial Technology (CFT). Aan de TU/e verricht Bert Roozen onderzoek op het gebied van technieken voor lokalisatie van geluidsbronnen, actieve methoden in de geluidsbeheersing, en op het gebied van geluidsgeneratie door banden.

## Colofon

### Productie:

Communicatie Service  
Centrum TU/e

### Fotografie cover:

Rob Stork, Eindhoven

### Ontwerp:

Plaza ontwerpers,  
Eindhoven

### Druk:

Drukkerij Lecturis,  
Eindhoven

ISBN: 90-386-1313-X

### Digitale versie:

[www.tue.nl/bib/](http://www.tue.nl/bib/)