

L.J.F. Hermans

Natuurkunde.....nou en?



Universiteit Leiden

Natuurkunde.....nou en?

Rede uitgesproken door

Prof.dr. L.J.F. Hermans

bij zijn afscheid als hoogleraar Natuurkunde
aan de Universiteit Leiden
op dinsdag 3 december 2002.

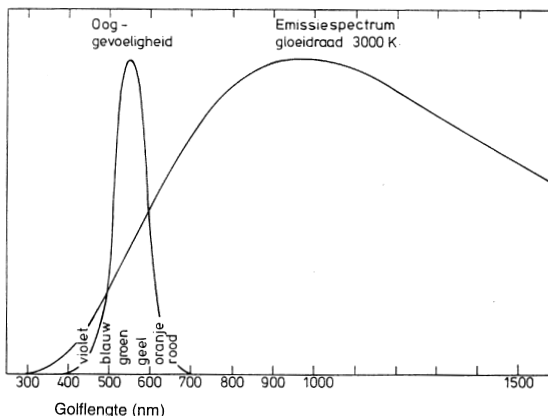
Mijnheer de Decaan, dames en heren studenten,

Ook al zie ik vandaag hier en daar wat meer grijs dan doorgaans in de collegezaal het geval is: studenten zijn we allemaal. “Education permanente” is tenslotte ons devies. Bovendien zijn wij allen studenten Natuurkunde. Natuurkunde is immers overal. Het leven van alledag is ervan doordrenkt, al zijn we ons daar niet altijd van bewust. Het leek me daarom aardig om in dit college een paar onderwerpen aan te roeren die bij de gewone colleges niet of nauwelijks aan bod komen. Als aanknopingspunt wil ik nemen drie facetten van de natuur – van de natuurwetenschappen – die hier vanmiddag een rol spelen: Licht, want we willen elkaar zien; Geluid, want u wilt mij horen, en het binnenklimaat, want we willen ons bij dit alles comfortabel voelen. Ik zal hierbij geen audiovisuele hulpmiddelen gebruiken, en geen demonstratieproeven doen. Wel zal ik af en toe naar de figuren verwijzen die u op uw bank hebt aangetroffen, en waarvan ik hoop dat ze duidelijk genoeg zijn om mijn verhaal begrijpelijk te maken, maar niet zó duidelijk dat mijn verhaal overbodig wordt.

Licht

Dan eerst iets over licht. Het zal u al zijn opgevallen toen u hier binnenkwam: De verlichting van dit auditorium is aangepast aan de stijl van dit gebouw en aan de sfeer van de activiteiten die er plaatsvinden. Er is dus gekozen voor de klassieke gloeilamp als lichtbron.

Nu herinneren we ons dat de gloeilamp wel gezellig is, maar niet zo efficiënt: hij gebruikt veel stroom en geeft weinig licht. Hoe zit dat eigenlijk? Wel, de efficiency wordt vooral bepaald door de mate waarin de uitgezonden straling, de emissie, door ons oog kan worden waargenomen. We moeten dus eigenlijk het emissiespectrum van zo'n gloeilamp vergelijken met de ooggevoeligheidskromme. U kunt dit zien in de eerste figuur [1]. De linker curve laat zien dat ons oog gevoelig is voor golflengten



Figuur 1: Oog versus Gloeilamp

ongeveer tussen 400 en 700 nanometer, de kleuren van de regenboog. De piek ligt rond 500 nm, in het geel. Rechts staat het spectrum dat door de gloeidraad in de lamp wordt uitgezonden. De piek dáárvan ligt bij 1000 nm. Die twee krommen vallen dus op geen stukken na samen. Veruit het grootste deel van de emissie valt buiten het bereik van het oog, en gaat verloren. We zouden dus graag die curve meer naar links schuiven. De voor de hand liggende oplossing zou zijn de gloeidraad heter te maken dan de gebruikelijke 3000 K (zo'n 2700 °C). We herinneren ons dat bij een hogere temperatuur niet alleen méér straling wordt uitgezonden, maar dat dit ook bij een kleinere golflengte gebeurt, net zoals de kleur van een gloeiend stuk metaal, naarmate het heter wordt, van rood naar oranje naar geel gaat, en dus opschuift naar links. Maar als we hoger willen dan die 3000 K, lopen we al gauw tegen het smeltpunt aan. Als we daar te dicht bij komen, neemt de levensduur van de gloeilamp dramatisch af. Met een halogeenvulling is daar nog wel iets aan te doen, maar dat smeltpunt stelt een harde limiet.

Wat we zouden willen is een straler die zijn piek bij een $2 \times$ zo korte golflengte heeft, daar waar het oog het gevoeligst is. Dan moet hij (volgens de wet van Wien) een $2 \times$ zo hoge temperatuur hebben, dus zo'n 6000 K. De buitenkant van de zon heeft ongeveer die temperatuur, en het zonnespectrum piekt dus vrijwel precies bij dezelfde golflengte als de ooggevoeligheidscurve. En dat is niet toevallig, uiteraard.

Kortom: Voor hoge efficiëntie moeten we hoge temperaturen hebben. Dat kan met gloeiend gas, zoals in de zon, de TL-buis en de spaarlamp. Een metalen gloeidraad haalt die temperatuur gewoon niet. Maar het licht dat hij geeft is wel gezellig: zoals we uit het plaatje kunnen aflezen is de emissie in het rood-oranje 2 à 3 maal zo sterk als in het blauw. Dat geeft een warm soort licht. Nadeel daarvan is natuurlijk dat we daarmee blauwe voorwerpen slecht zien. U kent dat verschijnsel uit de kledingwinkel, U moet even naar buiten om te zien of iets blauw is of zwart.

Tot zover de kleur van de verlichting. Hoe zit het met de intensiteit? Die is hier natuurlijk veel lager dan die van zonnestraling. Hoeveel lager? Zal het een factor 5 zijn, of 10, of 50 misschien?

Ik heb even zitten rekenen. Alle lampen hier bij elkaar zijn goed voor 3000 W. Uitgesmeerd over het hele vloeroppervlak (en met aftrek van het deel dat naar boven straalt) levert dat gemiddeld zo'n 5 W/m^2 . Dat is ruim 200 maal zo zwak als de zon. Met onze ogen dicht hadden we zoiets al kunnen aanvoelen, letterlijk, met onze handen. De warmte die we voelen van de verlichting valt volstrekt in het niet bij de warmtesensatie die we voelen in de volle zon.

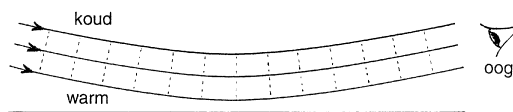
Maar het is nog erger: omdat het licht van een gloeilamp zo slecht past bij de gevoeligheid van ons oog, is, in termen van licht, het verschil tussen hier en in de volle zon nog groter, ongeveer een factor 1000.

Toch kunnen we hier, in dit auditorium, net zo makkelijk lezen als in de volle zon. Kennelijk heeft het oog een groot bereik, een groot adaptatievermogen. Hoe groot eigenlijk? We kunnen dat mooi schatten door gebruik te maken van de constatering

dat we de krant kunnen lezen in de volle zon, maar ook bij de volle maan – althans de jongeren onder ons. Nu kunnen we vrij gemakkelijk uitrekenen met welk percentage van het zonlicht die volle maan correspondeert. Uit de afmeting van de maan, zijn afstand tot de aarde en zijn gemiddelde reflectiecoëfficiënt (de “albedo”) vinden we dat het licht van de volle maan bijna een miljoen maal zwakker is dan van de volle zon. Kortom: als we het krant lezen als criterium hanteren, dan blijkt het adaptatievermogen van het oog ongeveer een factor 1 miljoen te bedragen.

Het zal duidelijk zijn dat maar een klein deel daarvan op rekening komt van de veranderende pupildiameter. Die varieert immers hooguit een factor 3 à 4, en in oppervlak dus ruwweg een factor 10. De overige 10^5 in adaptatie komt dus op rekening van de fotoreceptoren in het netvlies. Als de film in uw camera net zo'n grote belichtingsspeelruimte had, had u *nooit* meer een flits nodig.

Hoe fantastisch goed onze ogen ook zijn, ze kunnen ons onder sommige omstandigheden toch aardig op het verkeerde been zetten. Ze laten ons soms dingen zien die er helemaal niet zijn. Denk aan Fata Morgana-achtige verschijnselen, of luchtspiegelingen, die u natuurlijk allemaal kent: we rijden 's zomers op de zonnige autoroute, en ver voor ons zien we plassen op de weg, maar als we dichterbij komen blijken die er niet te zijn. Wat er natuurlijk gebeurt, is dat we weliswaar naar de weg kijken, maar de blauwe hemel zien, alsof er een spiegel op de weg lag. In figuur 2 is geschetst hoe dat komt. De lichtstralen worden boven het hete asfalt afgebogen, doordat de lichtsnel-

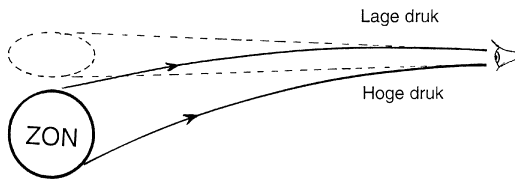


Figuur 2: Licht en Temperatuur

heid daar een tikkeltje groter is dan hogerop. Dit is een belangrijk punt om ons even te realiseren, want we hebben dat later in het college weer nodig: De snelle kant van de lichtbundel krijgt automatisch de buitenbocht. Verbeeld u maar even dat zo'n stip-pellijn in figuur 2 bestaat uit een aantal mensen, van bovenaf gezien, die arm in arm in de pas lopen. Als de mensen in de rechterflank iets grotere stappen gaan nemen, wordt de richting waarin de rij beweegt geleidelijk afgebogen naar links. In het geval van licht wordt de hogere snelheid vlak boven het hete asfalt veroorzaakt doordat de lucht daar uitzet en dus ijler wordt. (Daarmee gaat ze meer op vacuüm lijken, en in vacuüm is de lichtsnelheid het grootst.) Het scheelt allemaal niet veel, maar over voldoende grote afstand levert het toch een aardige afbuighoek op. Als we naar het asfalt dichtbij kijken wordt die afstand kleiner, de afbuighoek wordt dan te klein om de hemel nog te halen, en de “plassen” zijn verdwenen.

Als er géén temperatuurverschillen zijn kunnen de lichtstralen toch worden afgebogen, namelijk doordat de luchtdruk geleidelijk afneemt met de hoogte. Is dat effect niet erg klein? Ja, maar het zorgt er wél voor dat we de zon nog net boven de

Noordzee zien uitsteken terwijl hij in feite al is ondergegaan [2]. Het plaatje dat dat zojuist hebben gebruikt werkt dan natuurlijk precies andersom: de ijlste lucht, dus de hoogste snelheid, dus de buitenbocht, zit nu aan de bovenkant, en de lichtstralen buigen naar beneden, om de horizon heen. In figuur 3 is dat schematisch weergegeven.



Figuur 3: Licht en Luchtdruk

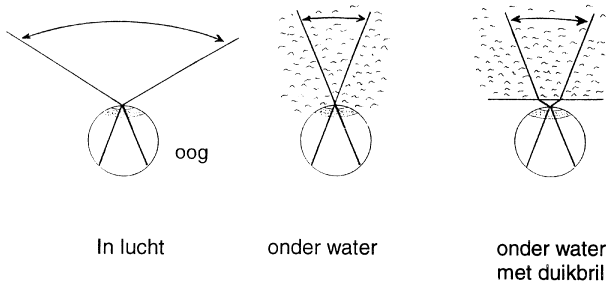
Bovendien lijkt de zon afgeplat: de hoogte is nog maar ca. $4/5$ van zijn breedte, en dat komt doordat de laagste stralen het meest worden afgebogen. Ze leggen de grootste afstand door de atmosfeer af. Eindresultaat: De zon lijkt hoger dan hij is, en de onderkant lijkt extra hoog.

In de praktijk kunnen er vreemde varianten van dit gedrag optreden, doordat dit barometereffect gelijktijdig kan optreden met het eerder besproken temperatuureffect. Daardoor kan de ondergaande zon de meest wonderlijke vormen aannemen (zie b.v. referentie [3]).

Nu wil ik u even meenemen van het kille Noordzeestrand naar het warme water van de Middellandse zee. Als we het water induiken, hoe helder ook, merken we dat we toch niet gebouwd zijn op leven onder water: we zien namelijk alles wazig. Pas als we een duikbril opzetten is alles weer keurig scherp. Is dat niet gek? Die duikbril heeft immers geen lenzen, maar gewoon vlak glas.

De verklaring ligt in de bolle voorkant (het hoornvlies) van ons oog. Die werkt – gewoon in de lucht – als een lens, een sterkere lens dan de eigenlijke ooglenzen, en is dus onmisbaar voor een scherp beeld op het netvlies. Met de ogen in het water gaat dat mis, omdat de oogbol, optisch gezien, veel op water lijkt. De stralen gaan dan dus vrijwel ongefocuseerd het oog in, en die bolle voorkant doet er weinig meer toe. Het is grappig te bedenken dat vissen met platte i.p.v. bolle ogen veel minder gehandicapt zijn dan het wellicht lijkt.

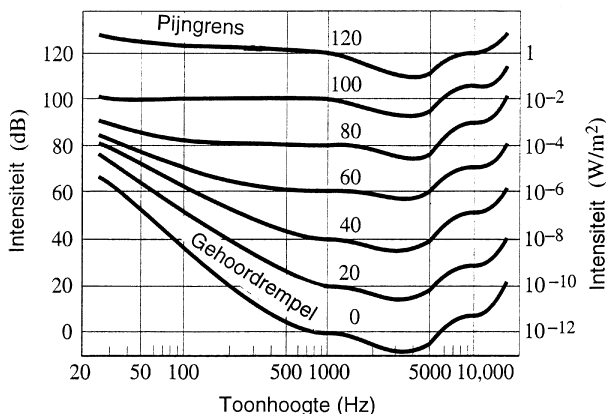
Met de duikbril op gaat het dus prima, onder en boven water, omdat het oog omgeven blijft door lucht. Alleen gebeurt er onder water nog iets onverwachts: het blikveld wordt ineens een stuk kleiner. We moeten ons hoofd veel verder draaien dan we gewend zijn, om te zien wat er achter ons gebeurt. Dat komt doordat onder normale omstandigheden het blikveld extra groot is, door de breking van de lichtstralen als ze het oog ingaan: Als ik nu recht vooruit kijk, zie toch nog vrij veel van wat er opzij gebeurt. In figuur 4 is dat in het linker plaatje geschetst. Onder water verdwijnt dat voordeel, zoals geschetst in het middelste plaatje. Een duikbril verandert daar niet veel aan, omdat de overgangen water-lucht en lucht-oog elkaar vrijwel compenseren, zie het rechter plaatje.



Figuur 4: Blikveld

Geluid

Genoeg over licht. Ik wil nu overstappen op geluid. Zoals u weet bestaat geluid uit periodieke compressies en expansies van het medium waardoor het zich voortplant. Dat kon met de vroegere 78 toeren platen eenvoudig worden geïllustreerd. Je kon de plaat afspelen door een briefkaart op z'n punt in de draaiende groef te houden. De briefkaart ging dan heen en weer in het ritme van de muziek, en veroorzaakte de gewenste compressies en expansies van de lucht. Het geluid was niet mooi, maar het werkte. Thuis gebruiken we natuurlijk een versterker en luidsprekers. Daarmee kan het geluid harder worden gezet. Hoe hoog moet de intensiteit eigenlijk zijn om door het oor te worden waargenomen? Dat hangt af van de toonhoogte. In het gebied waar het oor het gevoeligst is, iets boven 1000 Hz, blijkt 10^{-12} W/m² (een miljoenste van een miljoenste Watt per m²) al voldoende om net gehoord te worden. U kunt dat zien in figuur 5. Daarin staat horizontaal de frequentie, of toonhoogte, in een logaritmi-



Figuur 5: Oor en Geluidsintensiteit (zie b.v. ref. 4)

sche schaal, net als bij de piano: links het laag, rechts het hoog. Verticaal staat de intensiteit. Die kunt u beschouwen als de volumeknop van de versterker. Die verticale

schaal staat links in dB (waarbij 10 deciBell ofwel 1 Bell staat voor een factor 10), en rechts in W/m^2 . Elk van de curven geeft een bepaalde luidheidsindruk voor het oor weer. De onderste is de gehoordrempel, en zoals gezegd, ligt die in het gevoeligste gebied op ca. $10^{-12} W/m^2$. Bij heel lage en heel hoge frequenties is een hogere intensiteit nodig om te kunnen horen: de curve loopt daar op. De andere curven corresponderen, van beneden naar boven, in muziektermen uitgedrukt, met pianissimo, piano, mezzo forte enz. tot fortissimo. De allerbovenste is de pijngrens.

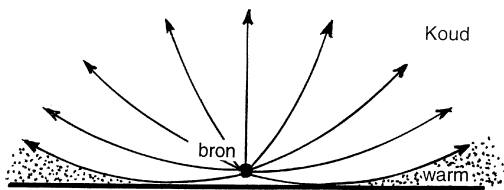
In dat plaatje vallen een aantal dingen op.

1. Het gaat om kleine intensiteiten. Ons oor is dus erg gevoelig. Ter vergelijking: als de lampen hier in het auditorium hun energie in de vorm van geluid zouden uitzenden, dan zou dat, met die $5 W/m^2$ al boven de pijngrens uitkomen.
2. Het plaatje zegt ook iets over de geluidsbron die verantwoordelijk is voor deze intensiteiten. Neem bijv. een gemiddeld niveau van 60 dB. In de rechter schaal zien we dat dit correspondeert met $10^{-6} W/m^2$, een microwatt per m^2 dus. Als de geluidsbron die deze intensiteit produceert vrij dichtbij staat, zodat de energie over een oppervlak van bijv. $10 m^2$ wordt uitgesmeerd, dan produceert de geluidsbron dus 10 microwatt aan echt geluid. Dat is weinig. Het betekent bijv. dat de ouderwetse radio, met een verbruik van zo'n 100 W, in feite een elektrische kachel was met een beetje lawaai als bijproduct. Het betekent ook dat een spreker op een gemiddeld niveau ook rond 10 microwatt, $10^{-5} W$, aan geluidsenergie produceert. Het is aardig om eens te kijken hoeveel energie een hoogleraar of docent in zijn gehele loopbaan bij elkaar praat. Of, liever nog, hoeveel geluidsenergie ieder van ons tijdens het gehele leven produceert. Laten we eens een ruime bovengrens nemen en aannemen dat we 24 uur per dag praten, 365 dagen in het jaar. Dat levert 24×365 , ruim gerekend $25 \times 400 = 10.000$ uur. Als we honderd jaren worden is dat dus ten hoogste 1 miljoen uur, 10^6 uur. De totale geluidsenergie tijdens het leven wordt dan dus $10^{-5} W \times 10^6 \text{ uur} = 10 \text{ Wh}$ ofwel 0.01 kWh. Zelfs met een hoge energieprijis van 50 Eurocent per kWh betekent dit dus dat we ons hele leven kunnen praten voor een cent.
3. Een derde punt dat in dat plaatje opvalt is het geweldige intensiteitsbereik dat onze oren aan kunnen: zoals we uit de verticale as kunnen aflezen is dat ongeveer een factor 10^{12} , een miljoen maal een miljoen. Helemaal verbazend is dat niet: een koor van 100 zangers klinkt natuurlijk harder dan één zanger in z'n eentje, maar zo heel groot vinden onze oren dat verschil niet. Dat grote bereik is niet alleen indrukwekkend, het lijkt ook verontrustend in het kader van de geluids-overlast. Immers, we verwachten dat de intensiteit afneemt met het kwadraat van de afstand tot de bron, omdat de geluidsenergie wordt uitgesmeerd over het oppervlak van een steeds groter wordende denkbeeldige bol. Als we dus in de buurt staan van een harde geluidsbron die pijn begint te doen aan onze oren – een startend vliegtuig of een disco-luidspreker – dan zouden we de afstand tot die bron een miljoen maal zo groot moeten maken om het geluid niet meer te horen. Dat zou het leven buitengewoon lawaaiig maken. We zouden bij wijze van spre-

ken last hebben van herrie in Honduras en kabaal in Kabul. Dat dit in de praktijk erg meevalt danken we vooral aan de absorptie van het geluid in de lucht. Bij elke compressie en expansie gaat een klein tikkeltje geluidsenergie verloren. (De hoge tonen hebben daarvan dus het meest te lijden. Dat merken we bijvoorbeeld bij onweer: dezelfde donderslag die van dicht bij nog veel scherpe, hoge tonen bevat, klinkt in de verte alleen nog maar als een dof gerommel.)

4. Tenslotte een vierde kanttekening bij dit plaatje. Die betreft de *vorm* van de curven. De laagste curven, inclusief de gehoordrempel, lopen aan de linkerkant nogal steil, en dat heeft consequenties voor uw muziekinstallatie thuis. Stel we draaien de volumeknop van de versterker omlaag, naar een lagere geluidsintensiteit. Dan komen we dus op een van de onderste dunne horizontale lijnen terecht. Maar dan zakken we links, bij de lage tonen, al gauw beneden de gehoordrempel. We missen dan het laag, tenzij we dat selectief wat extra versterken. Dat nu is precies wat de “Loudness-knop” voor ons doet. Als we die indrukken worden de lage tonen wat extra versterkt, zodat er toch een redelijk evenwichtige klankkleur ontstaat.

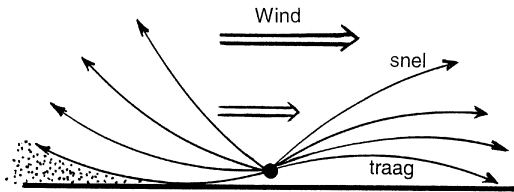
Genoeg over dit plaatje, en terug naar geluid in het vrije veld. Hoe komt het dat we op sommige dagen veel meer last van de autoweg in de verte lijken te hebben dan op andere? Zou dat komen door het afbuigen van de geluidsgolven, net als bij licht? Natuurlijk komt dat afbuigen ook bij geluid voor. Immers, het sleutelwoord is: voortplantingssnelheid. In lucht is de geluidssnelheid gerelateerd aan de thermische snelheid van de moleculen: die moeten de drukverstoringen immers doorgeven, en dat kunnen ze niet sneller doen dan ze zelf bewegen. En omdat de thermische snelheid van de moleculen toeneemt met de temperatuur, geldt ook hier: hoe warmer de lucht, hoe hoger de geluidssnelheid. Dat is dus net als bij licht, al is de fysische achtergrond heel verschillend. Als op een zonnige dag de lucht vlak boven de grond warmer is dan iets hogerop, dan is daar ook de geluidssnelheid hoger. We moeten dus voor geluid een soortgelijk gedrag verwachten als voor licht, vergelijk het hete-asfalt-plaatje van fig. 2. Als we uitgaan van een geluidsbron vlak bij de grond, kromt het geluid dus van de aarde weg. Dit is geschetst in figuur 6. Het geluid heeft de neiging over ons heen te



Figuur 6: Geluid en Temperatuur

gaan, en de geluidsoverlast neemt af. Er ontstaat zelfs een soort geluidsschaduw, waar weinig geluid doordringt. Dat is aangegeven met die donkere gebieden.

Echt interessante afbuigeffecten kunnen optreden bij wind. Hoe komt het dat de bewoners van Oostenrijkse bergdorpjes de klokken uit het naburige dal soms kunnen horen luiden over de bergkam heen? En hoe komt het dat we de herrie van de auto-
weg in de verte vaak veel beter horen als de wind daarvandaan waait? Komt dat door-
dat het geluid er dan minder lang over doet? Dat is niet waarschijnlijk. Zeker, de
geluidssnelheid is in dat geval de “echte” geluidssnelheid van stilstaande lucht plus de
windsnelheid, maar de intensiteitsverschillen die daardoor veroorzaakt worden zijn
nauwelijks waarneembaar. Het geheim zit in het toenemen van de windsnelheid met
de hoogte. Dat betekent dat ook de geluidssnelheid toeneemt met de hoogte in de
richting waarin de wind waait, en juist afneemt tegen de wind in. Dit levert een
afbuigpatroon op zoals geschetst in fig. 7. De linkerkant van dit plaatje levert het
beeld op van fig. 6, omdat de geluidssnelheid ook hier afneemt met de hoogte. De



Figuur 7: Geluid en Wind

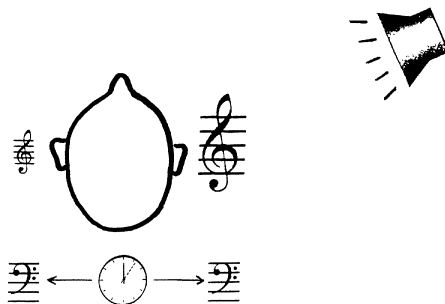
geluidsgolven krommen dus naar boven, en tot zover geen nieuws. In de rechterkant van het plaatje waait de wind met het geluid mee, de geluidssnelheid neemt nu toe met de hoogte, en de geluidsgolven krommen naar beneden, ook over eventuele obstakels heen. Dat verklaart het klokgelui in het bergdorp. Het verklaart ook waar-
om we meer last hebben van de autoweg als de wind van die kant waait, zelfs als er
geluidsschermen staan. Juist vlak boven zo'n scherm zijn de snelheidsgradiënten extra
groot, en de kromming dus extra sterk. Daardoor is de geluidsschaduw achter het
scherm veel korter dan je zou verwachten, zoals onlangs bij TNO-TPD in Delft uit-
voerig is aangetoond (zie b.v. [5-7]).

Spelen temperatuur en wind ook een rol bij muziek? Wat de temperatuur betreft heb-
ben we een mooi voorbeeld bij de hand, hier in het auditorium: het orgel. Ik voorspel
dat dat straks, na afloop van dit college, een tikkeltje hoger zal klinken dan aan het
begin, en wel doordat de temperatuur oploopt. Zou dat komen doordat de orgelpij-
pen uitzetten? Nee, daar zou de toon juist lager van worden. Bovendien: vaste stoffen
zetten weinig uit, veel minder dan vloeistoffen en gassen. Wat veel belangrijker is, is
de toename van de geluidssnelheid bij hogere temperatuur. De lengte van een orgel-
pijp bepaalt niet rechtstreeks de tóonhoogte, maar de golflengte. Als de golflengte
vastligt, dan gaat de toonhoogte omhoog met de geluidssnelheid. Je zou kunnen zeg-
gen: de drukgolven moeten in die pijp nog steeds even ver lopen, maar omdat ze nu
sneller zijn kunnen ze vaker per seconde op en neer. Dus: hoe hoger de temperatuur,

hoe hoger de geluidssnelheid, hoe hoger de toon. In dit opzicht verschilt het orgel – en eigenlijk alle blaasinstrumenten – principieel van snaarinstrumenten. Daar wordt immers wél rechtstreeks de toonhoogte bepaald door de frequentie van de snaar, en doet de geluidssnelheid van de lucht er niet toe. Dit kan natuurlijk gekke consequenties hebben voor de stemming van een orkest (zie b.v.[8]).

Geluid speelt natuurlijk ook een grote rol in het sociale verkeer, vooral in de vorm van spraak. Hier, in het Groot Auditorium, is de situatie vanuit natuurkundig oogpunt vrij overzichtelijk. Ik ben de enige die praat, en zelfs zonder gebruik van de microfoon zou ik waarschijnlijk zowel voorin als achterin de zaal goed te verstaan zijn: uw oren hebben immers een groot bereik. Straks, tijdens de receptie, wordt het een stuk boeiender (ik bedoel: in akoestisch opzicht). Daar worden veel gesprekken tegelijk gevoerd, terwijl we doorgaans maar één gesprek tegelijk willen volgen. En we slagen daar meestal nog vrij goed in ook.

Dit verschijnsel dat we één gesprek kunnen selecteren uit een zee van achtergrondgeluiden, wordt wel het “Cocktail party effect” [8] genoemd. De vraag is nu: hoe werkt dat? Natuurlijk speelt hier niet alleen het geluid zelf een rol. Ook liplezen is belangrijk. Het is experimenteel aangetoond dat blinden extra veel moeite hebben om dat éne gesprek te volgen. Ook mensen die maar met één oor horen blijken in dit opzicht gehandicapt. Het blijkt namelijk dat de richtingsgevoeligheid hier een grote rol speelt, en daarvoor zijn twee oren nodig. Door hun verschillende posities vangen onze oren immers het aangeboden geluid op iets verschillende manieren op. Twee mechanismen spelen hier een rol [9]. Ze staan symbolisch in fig. 8 aangegeven.



Figuur 8: Richting horen

1. Allereerst het tijdsverschil. Als geluid van opzij (of schuin van opzij) komt zal het ene oor dat geluid iets eerder horen dan het andere, en onze hersenen kunnen dat heel gevoelig waarnemen. Dit mechanisme werkt alleen goed voor lage tonen, dus lange golflengten. Om dat in te zien moeten we even kijken naar de grootte van die golflengte. Die volgt uit de geluidssnelheid, ruim 300 m/s, en de toonhoogte. Neem bijv. een vrij lage toon van 100 Hz. Daarvoor is de golflengte dan ruim 3 m.

Dit is veel groter dan de afstand tussen onze oren, zodat de oren één en dezelfde golf (in een iets andere fase) zullen waarnemen. Kiezen we daarentegen een toon uit het middengebied waarvan de golflengte gelijk is aan de afstand tussen de oren, dan zullen geluidsgolven van opzij de twee oren in precies dezelfde fase treffen, ook al zit er dan één golflengte verschil tussen. Daarmee is dit geluid niet te onderscheiden van geluid dat precies van voren of precies van achteren komt. De informatie is dus niet meer eenduidig. Onze oren raken in de war. Dat geldt evenzo voor nog kleinere golflengten. Het is duidelijk dat het tijdsverschil als mechanisme om de richting te bepalen voor dit soort korte golven faalt.

2. Gelukkig hebben we voor de korte golven een tweede mechanisme: het intensiteitsverschil. Juist die korte golven, die kleiner zijn dan ons hoofd, zullen zo'n intensiteitsverschil vertonen tussen links en rechts. Neem bijv. een honderd maal zo hoge toon als zojuist (10.000 Hz i.p.v. 100 Hz). Dan zal de golflengte geen 3 m zijn, maar 3 cm, een stuk kleiner dan ons hoofd. Als het geluid van pal opzij komt heeft het verre oor last van het feit dat het hoofd in de weg zit: het hoofd vormt een soort geluidsschaduw. Metingen laten zien dat die verschillen tussen links en rechts gemakkelijk tot 35 dB kunnen oplopen [10]. Zulke grote verschillen zijn natuurlijk uitstekend te horen.

De grote richtingsgevoeligheid die wij blijken te bezitten is nog niet in alle finesse begrepen. Duidelijk is wél dat de hoge tonen een heel belangrijke rol spelen. Nu wordt het ook begrijpelijk waarom we, als we ouder worden, met dat "Cocktail party effect" [11] wat meer moeite krijgen, terwijl we verder toch prima horen: Juist voor die hoge tonen gaat de gevoeligheid van onze oren sterk achteruit. Dat begint al op vrij jonge leeftijd: zo rond je 65^e is de gevoeligheid voor die 10.000 Hz al meer dan 40 dB verslechterd, terwijl er voor lage tonen nauwelijks achteruitgang is [12].

Nu kan ik mij best voorstellen dat u denkt: dat verhaal over die richtingsgevoeligheid is wel mooi, maar geen van de twee besproken mechanismen verklaart hoe we erin slagen om vast te stellen of geluid van voren of van achteren komt. Daar zal de vorm van de oorschelp vast mee te maken hebben, want die heeft geen voor-achter-symmetrie. Dat is inderdaad correct. Als je de oorschelp met een kunstmatig voorzetstuk wél symmetrisch maakt, blijkt het veel moeilijker om dat onderscheid tussen voor en achter vast te stellen [10,13]. De vorm van de oorschelp helpt ons dus met dat onderscheid. Maar daarnaast is er nog een hulpmiddeltje: we draaien ons hoofd, als we niet zeker weten of het geluid van voor of van achter komt. En door het draaien van het hoofd wordt het voor-achter-onderscheid omgezet in een links-rechts-onderscheid, en daar weten onze oren wel raad mee.

Binnenklimaat

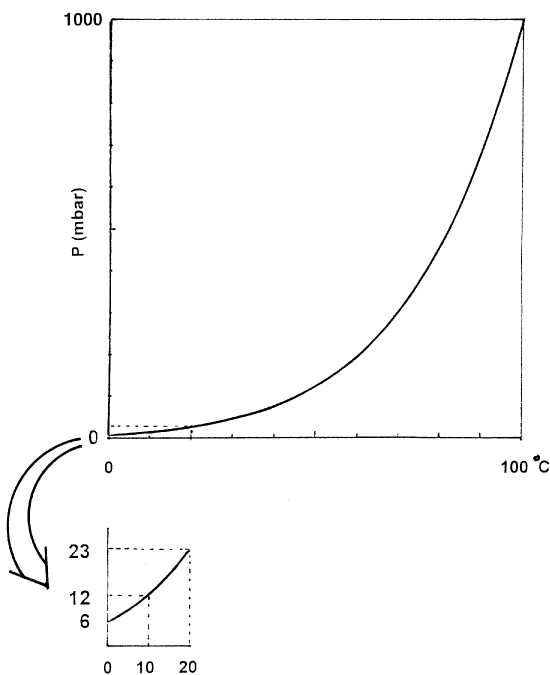
Genoeg over geluid. Ik wil nu even stilstaan bij het derde facet dat hier vanmiddag een rol speelt: ons comfort. Ik bedoel niet het comfort van de bank waarin u zit:

daarvoor zijn we afhankelijk van de ergonomische inzichten van de 16^e eeuwse meubelmaker. Ik bedoel het binnenklimaat; de temperatuur en de relatieve vochtigheid, twee aspecten die we wél in de hand hebben.

Laten we eerst eens kijken naar de luchtvochtigheid. Die is inmiddels – dank zij onze aanwezigheid – al aardig aan het oplopen. Aan het begin van de middag was ze vast en zeker nog ruim onder de 50%. Hoe weet ik dat? Eenvoudigweg doordat het buiten koud is.

Wat er gebeurt is dit. Zoals u weet kan koude lucht niet veel water bevatten, zelfs al is de relatieve vochtigheid 100%. Als die lucht naar binnen komt en verwarmd wordt, bevat hij nog steeds evenveel waterdamp, maar ze zou, bij die hogere temperatuur aanzienlijk méér kunnen bevatten. De relatieve vochtigheidsgraad daalt dus, en de grap is dat die daling fors uitvalt.

Dat is direct af te lezen uit de dampspanningscurve, die geschetst is in fig. 9. Langs de



Figuur 9: Binnenklimaat: H₂O-damp

horizontale as staat de temperatuur, van 0 tot 100° C. Verticaal staat de hoeveelheid waterdamp die de lucht kan bevatten, in termen van druk, in millibar (of hectopascal). De schaal loopt tot 1000 millibar, dus zeg maar atmosferische druk. Die wordt bereikt bij 100° C: daar kan waterdamp het deksel van de pan tillen.

Wat direct opvalt is de sterke, bijna exponentiële groei, die de curve vertoont. Het eer-

ste stukje is apart uitvergroet. We zien ongeveer een verdubbeling per 10 graden. Lucht kan bij 10° C ruwweg dubbel zo veel water bevatten als bij 0° C, en bij 20 graden bijna 4 × zoveel. Lucht van 0° C kan dus nog zo vochtig zijn, na opwarmen tot 20° is de relatieve vochtigheid niet veel meer dan een kwart, 25% dus. Vandaar die droge lucht in de winter.

Overigens: Links van de 0 gaat dat steile verloop gewoon door. Dat zorgt er bijvoorbeeld voor dat het in Siberië, in het midden van de winter, bijna nooit sneeuwt. Niet omdat het te warm is, maar omdat het te koud is. Bij -30, -40 °C zit er gewoon te weinig waterdamp in de lucht om sneeuw te vormen.

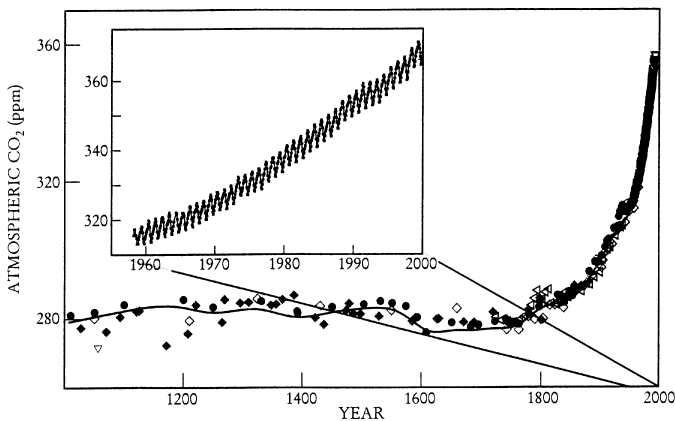
Een extreem geval van droge lucht door verwarming vinden we in de sauna. Als u wel eens op de thermometer hebt gekeken herinnert u zich misschien dat de temperatuur daar rond 90° C is. Dat blijkt ook wel als we onze armen heen en weer zwaaien: ze worden daar niet koeler van, zoals we gewend zijn, maar juist warmer, althans zolang ze nog droog zijn. Ondanks die 90 graden houden we het nog behoorlijk lang uit in de sauna. Dat komt natuurlijk grotendeels doordat lucht zo'n slechte warmtegeleider is, maar ook doordat ze in de sauna zo droog is. Daardoor transpireren we vrij gemakkelijk, en profiteren daarmee van het koelende effect van de verdamping. Hoe droog die lucht kan zijn blijkt uit het plaatje: als de buitentemperatuur rond het vriespunt ligt zit er zo weinig water in de lucht dat de relatieve vochtigheid bij 90° niet boven 1% uitkomt.

Onze eigen verdamping doet de relatieve vochtigheid natuurlijk wat stijgen, zij het niet zo veel als in dit auditorium, waar ze inmiddels tot zo'n 70% is opgelopen. Ook de temperatuur is aardig aan het stijgen, en dat terwijl de verwarming aan het begin van de middag is uitgeschakeld. Het auditorium wordt dus door duurzame energie verwarmd. Dat wil zeggen: voor 90% duurzaam. Elk van ons is namelijk een kachel van een kleine 100 W als we ons – zoals nu – lichamen niet inspannen. Dat volgt onmiddellijk uit de verbrandingswaarde van ons dagelijkse voedsel. Als we die uitsmeren over het etmaal, blijkt dat een kleine 100 J/s te zijn, ofwel 100 W. Met 300 personen zijn we dus goed voor $300 \times 100 = 30.000$ W, het vermogen van een forse CV-ketel. Dat is dus het bio-stuk, het duurzame stuk van de verwarming. Daarnaast is er nog de verlichting, zo'n 3000 Watt, zoals we al zagen. Uiteraard komt ook die energie geheel ten goede aan de verwarming van dit auditorium, behalve dan die paar foto's die door het raam naar buiten ontsnappen. De wet van behoud van energie zou niet anders toelaten. Dat geldt voor alle elektrische apparaten, ook thuis. Een TV toestel van 200 W is een kachel van 200 W. Een stofzuiger van 1000 W is een kachel van 1000 W, en een koelkast van 300 W is een kachel van 300 W, hoe gek dat ook klinkt. Omgekeerd is het energiegebruik rechtstreeks af te leiden uit de hoeveelheid warmte die iets produceert. We hoeven onze hand maar op de tuner, de elektrische klok, het scheerapparaat of de monitor te leggen, en we weten meteen: dit apparaat gebruikt wel veel energie en dát niet. Dat maakt het ook meteen duidelijk waar de grootver-

bruikers zitten: het zijn de dingen die veel warmte produceren, al komt die in de meeste gevallen de verwarming van ons huis ten goede. In sommige gevallen, met name als het warm water betreft, verdwijnt de warmte door de afvoer, en dat is dus echt verlies. In dit perspectief gezien is een bad nemen niet eens zo energieverlindend als wel wordt gedacht, mits we natuurlijk de stop er pas uit trekken als het badwater volledig is afgekoeld. Maar dat terzijde. Kern van de zaak is dat het allemaal draait om de warmte.

Van binnenklimaat, tot slot, een uitstapje naar het buitenklimaat.

Dames en heren studenten, en dan richt ik mij met name even tot de jongeren onder u. Het is mijn gewoonte om u op college een probleempje mee naar huis te geven om over na te denken, uw vernuft te scherpen en uw inventiviteit te vergroten. Het is dit keer geen makkelijk probleem: het betreft het CO₂ –probleem. Gegeven is de toegenomen CO₂ concentratie in de atmosfeer, waarvan de metingen in figuur 10 zijn weergegeven.



Figuur 10: Wereldklimaat: CO₂-gas (ref. 14)

De laatste 40 jaar zijn daar apart uitvergroot. (Die uitvergroting geeft de metingen weer die zijn gedaan op Maona Loa, Hawaii. Meetstations op andere plekken op aarde geven overigens precies hetzelfde resultaat.) Wat allereerst opvalt is de nauwkeurigheid waarmee de seizoenswisselingen worden gevolgd: in het voorjaar onttrekt het uitlopend groen CO₂ aan de lucht via de fotosynthese, en in de herfst geven de rottende bladeren het weer terug. Zonder menselijk ingrijpen zou de grafiek schommelen rond een constante waarde. In werkelijkheid is de hoeveelheid CO₂ sinds de industriële revolutie met bijna 1/3 toegenomen, van 280 ppm naar 360 ppm. In geologisch perspectief betekent dit het volgende. De fossiele brandstoffen waarover we beschikken zijn ontstaan over een lange reeks van jaren (van de orde van 100 miljoen jaar) doordat in die periode een zeer kleine hoeveelheid van de fotosynthese-

oogst aan de natuurlijke kringloop is onttrokken en is gefossiliseerd. Daarmee werd CO₂ aan de lucht onttrokken en in de vorm van steenkool, olie en aardgas in de grond gestopt, een mooie voorraad ingeblikte zonne-energie dus. Wij laten nu dat proces in omgekeerde richting verlopen - alleen op een tijdschaal die ruwweg een miljoen maal zo snel is.

Maar ik dreig af te dwalen. Het probleem is dat CO₂, zoals u weet, een z.g. broeikasgas is, door zijn absorptiebanden in het IR. Het speelt dus een belangrijke rol in de warmtehuishouding van de aarde. Gezien de forse toename is het wel zeker dat dit invloed heeft op het klimaat. Hoe dat precies zal lopen is niet met zekerheid te zeggen. Maar we kunnen ons niet permitteren om te wachten tot die zekerheid er wél is. Immers, ook al zouden we vandaag stoppen met CO₂-uitstoot, dan nóg duurt het heel lang voor het CO₂ gehalte weer in de buurt is van de waarde van voor de industriële revolutie. U moet denken in termen van een eeuw. Het probleem dat u nu moet oplossen is:

- a. Verzin een methode om het CO₂, dat vrijkomt bij verbranding van fossiele brandstoffen, weg te vangen en op te bergen.
- b. Bedenk alternatieve energiesystemen met hoge efficiency, die de fossiele brandstoffen kunnen vervangen. Denk daarbij met name aan de zon en aan kernfusie, de twee enige écht duurzame energiebronnen.

Bij het oplossen van dit vraagstuk verwacht ik vooral veel van de studenten van de nieuwe studie "Sustainable Molecular Science and Technology". Heb in elk geval de moed om van de gebaande paden af te wijken, en gun uzelf de ruimte om het ondenkbare te denken.

Dames en heren,

Dit college markeert de formele beëindiging van mijn activiteiten op het gebied van onderzoek en onderwijs in de natuurkunde. Natuurkunde nou en? Wat is eigenlijk het nut van universitair onderwijs en onderzoek in de Natuurwetenschappen? Gezien de vóórtdurende bezuinigingen in het Wetenschappelijk Onderwijs, en gezien ook de dreigende marginalisering van het vak Natuurkunde in het VWO, is het misschien goed om daar juist nu even bij stil te staan. Allereerst het fundamentele onderzoek, het verleggen van de grenzen van ons weten, het betreden en in kaart brengen van onbekend terrein. Dit is niet alleen een stuk cultuur, het vormt ook de basis van de technologische ontwikkelingen die onze welvaart dragen. Zonder het fundamentele onderzoek van 10, 50, 100 jaar geleden hadden we nu geen lap top in huis, geen GSM in onze zak, geen GPS in onze auto, geen streepjescode-kassa in de supermarkt, en geen echoscopie of MRI-scan in onze ziekenhuizen. De waarde van fundamentele research in twijfel trekken lijkt mij net zo absurd als de waarde van kinderen ter discussie stellen met het argument dat onze welvaart wordt gemaakt door volwassenen. Bovendien is actieve deelname aan het onderzoek voor onze studenten de beste manier om moeilijke problemen te leren oplossen. Ik heb daar zojuist een voorbeeld van gegeven.

En naast het onderzoek: het onderwijs. Natúúrlijk, het legt de noodzakelijke basis voor het doen van onderzoek. En natúúrlijk, onderwijs in de natuurwetenschappen is bij uitstek geschikt om analytisch te leren denken, en natuurlijk, ons bedrijfsleven heeft grote behoefte aan afgestudeerden in de Natuurwetenschappen. En ja, enige natuurwetenschappelijke basiskennis helpt ons ook om de grote uitdagingen waar we voor staan iets beter te begrijpen, om zin en onzin van elkaar te kunnen onderscheiden. En in een samenleving die in toenemende mate wordt beïnvloed door Wetenschap en Technologie is ook dat heel belangrijk. Maar daarnaast: het is ook gewoon leuk om iets meer te begrijpen van de wereld om ons heen, van de natuurverschijnselen van alledag. En het is vooral dat laatste aspect dat ik vanmiddag heb willen illustreren.

Dames en heren, ruim 32 jaar geleden stond ik hier mijn proefschrift te verdedigen, in dit Auditorium, op precies deze kathedraal. Geen indrukwekkende vooruitgang voor 1/3 eeuw hard werken, zult u misschien zeggen.

Maar het zijn jaren geweest waarop ik met evenveel genoegen als voldoening terugkijk. Ik heb dat te danken aan zo velen, dat ik niet zal proberen sommigen met naam te noemen, omdat ik daarmee anderen tekort zou doen. Het betreft vooral

- Mijn vroegere leermeesters, die dit college helaas niet meer konden meemaken;
- De promovendi en afstudeerders, met wie ik in het lab de frustraties én de opwindigheid heb gedeeld die inherent zijn aan het doen van onderzoek;
- Al die jaargangen studenten, zonder wie ik een belangrijke inspiratiebron zou hebben gemist;
- Mijn collegae aan de Leidse universiteit, aan de TU Eindhoven en aan de TU Delft, die van vakbroeders vrienden werden;
- De technische staf, die bij herhaling het onmogelijke mogelijk maakte;
- De verschillende secretariaten, met name dat van “de groep”, de enige echt constante factor in mijn natuurkundige loopbaan;
- Mijn collegae in het Faculteitsbestuur, en alle medewerkers in en rond het faculteitsbureau, waarmee de laatste vijf jaar een hechte band is ontstaan;
- Tot slot mijn gezin, dat al die jaren heeft geleefd met een fysicus. Nou én? Nou, volgens mij valt dat niet mee.

Ik heb gezegd.

Referenties

1. L.J.F. Hermans en A.J. Hoff, *ENERGIE, een blik in de toekomst*; Aula paperback 73, Het Spectrum, Utrecht, 1982.
2. M. Minnaert, *De Natuurkunde van 't vrije veld*, W.J. Thieme & Cie, Zutphen, 1968.
3. R. Greenler, *Rainbows, halos, and glories*, Cambridge University Press, Cambridge, 1980.
4. D.C. Giancoli, *Physics for Scientists & Engineers*, Prentice Hall, N.J., 2000.
5. E.M. Salomons, *Reduction of the performance of a noise screen due to screen-induced wind speed gradients. Numerical computations and wind tunnel experiments*, J. Acoust. Soc. Am. 105 (1999) pp.2287-2293.
6. E.M. Salomons en K.B. Rasmussen, *Numerical computation of sound propagation over a noise screen based on an analytic approximation of the wind speed field*, Applied Acoustics 60 (2000) pp.327-341.
7. E.M. Salomons, *Effectiviteit van geluidsschermen op de tocht*, Geluid, nr. 5, december 2000, pp.131-133 en 160.
8. John R. Pierce, *The Science of Musical Sound*, Freeman & Company, New York, 1996.
9. William M. Hartmann, *How We Localize Sound*, Physics Today, November 1999, pp. 24-29 (zie ook Physics Today, October 2002, pp. 13-14).
10. P.M. Hofman, *On the role of Spectral Pinna Cues in Human Sound Localization*, Proefschrift, KUN, 2000.
11. A.W. Bronkhorst en R. Plomp, *Effect of multiple speechlike maskers on binaural speech recognition in normal and impaired hearing*, J. Acoust. Soc. Am. 1992 Dec; 92(6), pp. 3132-3139.
12. J.A.P.M. de Laat, Audiologisch Centrum (LUMC), private communication.
13. P.M. Hofman, J.G. van Riswick en A.J. van Opstal, *Relearning sound localization with new ears*, Nature Neuroscience 1, 1998, pp. 417-421.
14. Jorge L. Sarmiento and Nicolas Gruber, *Sinks for Anthropogenic Carbon*, Physics Today, Aug. 2002, pp.30-36.