Robin Jakeways

Buiken, blazen en boventonen: grondbeginselen van de fysica voor fluitisten. Deel VI – Boventonen en klank

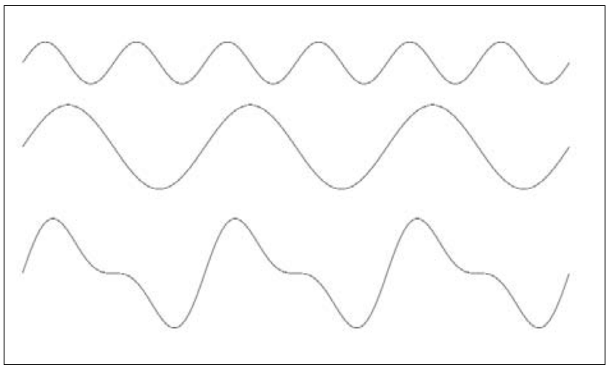
Heb je je wel eens afgevraagd hoe het komt dat een fluit anders klinkt dan een klarinet of een hobo? Of waardoor het je niet altijd lukt dezelfde toon te maken als je leraar? In deel VI van zijn serie over de natuurkunde van het fluitspelen geeft Robin Jakeways inzicht in de wetenschap achter boventonen en toonkwaliteit.

De vorige keer dat de lezers van FLUIT een portie natuurkunde kregen toegediend is al weer een hele tijd geleden,[1] maar volgens de redactie hebben zij er weinig bezwaar tegen, en er zijn zelfs vragen geweest om meer – en hier komt dus het volgende artikel! Ik heb alle oude artikelen nog eens doorgelezen om te zien of ik niet iets had overgeslagen, of niet heel duidelijk had uitgelegd (daar kon ik achteraf heel wat voorbeelden van vinden!), en ik kwam tot de ontdekking dat ik nogal snel over een heel belangrijk aspect van de muzikale geluidsleer ben heengelopen, dat niet alleen voor de fluit, maar voor alle instrumenten van grote betekenis is: de structuur van de boventonen en de toonkwaliteit.
Wie Deel IV (FLUIT 1999-3) bij de hand heeft, ziet dat ik daar beschrijf wat er gebeurt als twee tonen die een kwint vormen tegelijk worden gespeeld.[2] Ik laat zien hoe de dicht bij elkaar liggende boventonen van beide tonen zwevingen veroorzaken, die de samenklank erg ruw maken. Het lijkt me de moeite waard hier uitvoeriger op in te gaan en iets meer te zeggen over de structuur van de boventonen in het algemeen.
In Deel I (FLUIT 1997-3) heb ik een afbeelding van een eenvoudige (sinus-)golf laten zien, en ook een grafiek van een ingewikkelder golfvorm, die ik beschreven heb als 'een interessantere muzikale toon', maar ik heb dit punt toen niet verder uitgewerkt. Om dat te kunnen doen moeten we teruggaan naar het begin en iets meer proberen te begrijpen van wat er gebeurt als we een toon blazen op onze fluit – of spelen op een willekeurig ander instrument.

Als we bijvoorbeeld een lage a spelen (a^1), weten we dat de frequentie van die toon 440 Hz is (of zou moeten zijn), en als we de a een octaaf hoger spelen (a^2) wordt de frequentie 880 Hz. Of de golfvorm van deze tonen een eenvoudige sinusgolf is of iets ingewikkelders doet er niet toe; zolang het golfpatroon zich iedere 1/440 of 1/880 seconde herhaalt zullen allebei de tonen a's zijn. Wat wel zal verschillen is de klankkleur. De sinusgolf zal saai klinken, als een stemvork, maar de ingewikkelder golf zal een veel boeiender klank geven, misschien als een fluit, of als een hobo, een trompet, een viool, of een ander instrument dat een toon van dezelfde toonhoogte kan spelen.
De kneep zit hem hierin, dat de ingewikkelde golfvorm een situatie weergeeft, waarbij de lucht in de buis, of de snaar van de viool, eigenlijk een heleboel trillingen tegelijk laat horen. Op het eerste gezicht lijkt dat heel bizar. Stel je voor dat je twee keer per seconde in je handen klapt, een frequentie van 2 Hz dus. Wat je hoort is dan een regelmatige reeks van korte pieken van een tamelijk onbestemd geluid. Als je nu iemand zou vragen dat geluid met geschikte apparatuur te analyseren, zou hij of zij je kunnen vertellen dat het geluid eigenlijk bestaat uit een hele reeks sinusvormige golven, met frequenties van 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz ... 32 Hz, 34 Hz enzovoort. In feite klap je al deze frequenties tegelijk. Dat klinkt misschien nogal onbegrijpelijk, maar het heeft allemaal te maken met een proces dat bekend staat als de Fourier-analyse.
Fourier-analyse is een stukje wiskunde dat beschrijft hoe een ingewikkelde maar periodieke, dus regelmatige golfvorm altijd kan worden ontleed als de optelling van een aantal eenvoudige golven, die allemaal deel uitmaken van de boventonenreeks. Ik heb deze reeks beschreven in Deel II (FLUIT 1997-4), en daar is te lezen dat het een reeks van trillingsfrequenties is die zich op een heel eenvoudige manier tot elkaar verhouden, bijvoorbeeld 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz enzovoort.
We kunnen deze reeks ook in muzikale vorm beschrijven. Als de laagste toon c^1 is, zijn de volgende tonen in de reeks c^2, g^2, c^3, e^3, g^3, bes^3 (te laag!), c^4 enzovoort. We kunnen dus òf een ingewikkelde golfvorm door middel van een Fourier-analyse analyseren in afzonderlijke deelgolven, òf we kunnen het omgekeerde doen en de afzonderlijke golven van de boventonenreeks bij elkaar optellen om een ingewikkelde golfvorm te krijgen.

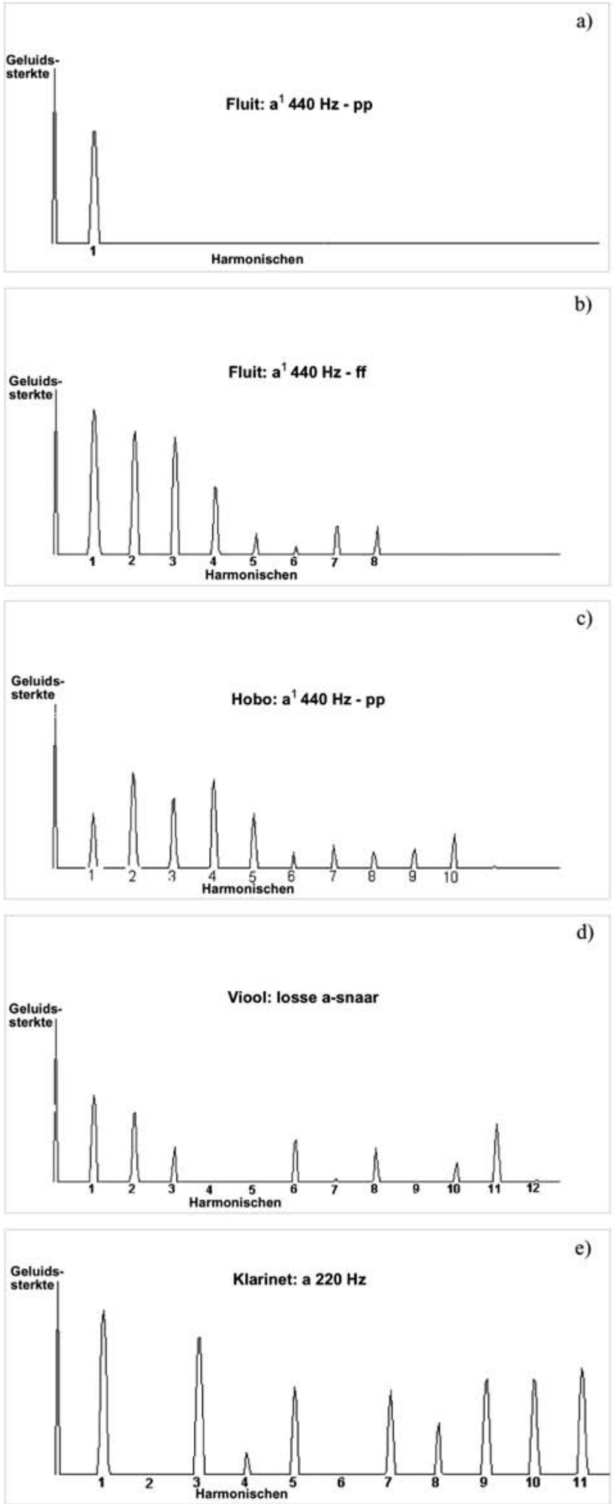
Gedachte-experiment
Laten we in gedachten een proef doen om te zien wat de tweede mogelijkheid oplevert (natuurkundigen zijn dol op gedachte-experimenten, want je hebt er geen dure apparaten voor nodig, en er kan niets verkeerd gaan!). Stel, je hebt een kleine luidspreker bevestigd aan de conus van een grotere luidspreker. Stel dat de grote trilt met 440 Hz, en de kleine door een aparte versterker wordt aangestuurd met 880 Hz. De kleine luidspreker zal uiteraard regelmatig trillen met 440 Hz, maar de samengestelde beweging zal de optelling zijn van zijn eigen afzonderlijke trilling en die van de grote luidspreker. Het zal geen eenvoudige sinusgolf zijn.
De toon die we dan zouden horen, zou een combinatie zijn van tonen van 440 en 880 Hz, maar nog steeds klinken als een a^1 van 440 Hz! Omdat we onszelf bij gedachte-experimenten geen beperkingen hoeven op te leggen kunnen we ons zelfs voorstellen dat aan de kleinste van de twee een nóg kleiner luidsprekertje bevestigd is, dat een sinustoon van 1320 Hz (= 3 x 440 Hz) weergeeft, met daaraan nog een kleiner,

dat trilt met 1760 Hz (= 4 x 440 Hz). De muzikale toon zou ingewikkelder en boeiender worden, maar nog steeds klinken als een a van 440 Hz.
Figuur 11 laat dit in de praktijk zien. Ik heb (in Excel) een eenvoudig computerprogrammaatje gemaakt om de eerste twee golven en hun optelling te tekenen. De bovenste golf is de eigen trilling van de tweede luidspreker, de volgende golf is die van de grote luidspreker, en, omdat de totale beweging van de kleinere luidspreker eenvoudig de optelling van de twee afzonderlijke trillingen moet zijn, laat de derde golf deze optelling zien.



Figuur 11. Het resultaat van de optelling van twee trillingen. De bovenste golf is de eigen beweging van een kleine luidspreker die trilt met 880 Hz. De tweede is de beweging van een grotere luidspreker die trilt met 440 Hz. De onderste (niet-sinusvormige) golf is de totale trilling van de kleine luidspreker, als deze stevig is bevestigd aan de grote.

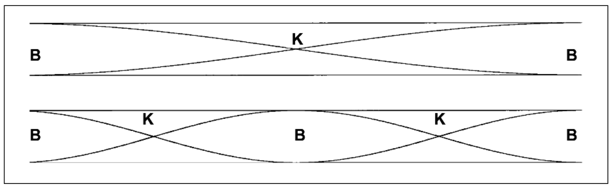
We hebben nog steeds een regelmatige golfbeweging, maar het is geen eenvoudige sinusgolf meer. Als je het programma een keer klaar hebt, is het heel gemakkelijk om door te gaan en zoveel golven bij elkaar op te tellen als je maar wilt, maar met twee golven kunnen we het principe al goed zien.
Figuur 12 laat zien wat je krijgt als je het omgekeerde doet van wat we in figuur 11 hebben gedaan, en een complexe golfvorm, d.w.z. een muzikale toon, ontleedt in de samenstellende harmonische componenten. Hiervoor heb ik gebruik gemaakt van een zogenaamd Fast Fourier Transform-programma. Precies dit programma kun je kosteloos downloaden van het web,[3] en als je een microfoon op je computer aansluit kun je aan het analyseren van allerlei tonen veel plezier beleven. Hier zie je een reeks pieken die sterkteverhoudingen van de verschillende harmonischen weergeven: '1' is de grondtoon, '2' en '3' enz. zijn de harmonischen. In de grafiek die het programma heeft gegenereerd zijn de sterktegraden gemeten in decibels, maar om het plaatje eenvoudig te houden heb ik de getallen weggelaten. Heldere instrumenten, met een 'scherpe' toon, zoals de hobo en de viool, hebben heel veel hoge boventonen. Als de fluit heel zacht wordt gespeeld is de toon milder, met weinig of geen boventonen.



Figuur 12a-e. Een boventonen-analyse van vijf verschillende tonen. De vertikale schaal is een decibelschaal met van boven naar beneden een bereik van ongeveer 40 dB.

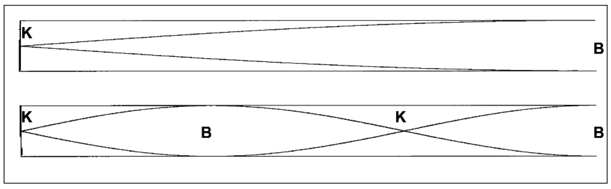
Probeer het nu op je eigen fluit. Speel een a in het lage register met een heel open embouchure en veel lucht. De toon zal heel vriendelijk klinken, en bijna een zuivere sinusgolf bij 440 Hz zijn. De analyse zal er ongeveer uitzien als figuur 12a. Span dan je embouchure meer aan, en blaas een heel fijne luchtstroom tegen de rand, om een toon te maken die niet veel sterker is maar wel een heel ander karakter heeft. Wat je dan

doet is het toevoegen van harmonischen aan de grondtoon van 440 Hz, zoals de analyse van mijn eigen fluittoon in figuur 12b laat zien. Je kunt die harmonischen niet apart horen, maar je weet dat ze er zijn doordat de klankkleur is veranderd.
Ik had het een keer aan de stok met een paar muziekstudenten die niet wilden geloven dat de lucht in een blaasinstrument tegelijkertijd kon trillen met verschillende frequenties. Alleen door heel slecht klarinet voor ze te spelen kon ik ze overtuigen! Voor ik beschrijf wat ik gedaan heb wil ik herinneren aan de knopen en buiken waarover ik in Deel II heb geschreven. Het ging over de trillingen van de lucht in een buis (van een fluit), en ik definieerde een knoop als een punt in de buis waar geen trilling optreedt, en een buik als een punt waar de trilling het grootst is.



Figuur 13.
De eerste twee staande golven die mogelijk zijn in een cilindrische buis die aan beide uiteinden open is (zoals een fluit). Buiken zijn aangegeven met B, knopen met K.

Figuur 13 (een fragment van figuur 7 uit Deel II) laat het patroon van knopen en buiken zien voor de eerste twee manieren waarop de lucht in de buis van een fluit kan trillen. Om te beginnen moeten er aan beide uiteinden van de buis buiken zijn, want beide uiteinden van de fluit hebben vrij contact met de buitenwereld. Om de patronen te vinden passen we eerst een en daarna twee knopen binnen de buis. De golflengte van de toon is twee keer de afstand tussen twee opeenvolgende knopen, en je kunt zien dat de golflengte van de toon in de tweede trillingswijze gelijk is aan de helft van de golflengte in de eerste. Omdat je de frequentie van een toon kunt bepalen door de geluidssnelheid door de golflengte te delen, kun je gemakkelijk uitrekenen dat de frequentie van de tweede trillingswijze van de lucht in de buis van een fluit twee keer zo groot is als die van de trilling van grondtoon, d.w.z. een octaaf hoger. De boventonen reeks begint al tevoorschijn te komen!
De klarinet gedraagt zich heel anders. Het uiteinde waar de speler op blaast is zo'n klein gaatje, dat het voor de geluidsgolf in de buis geldt als een dicht uiteinde. De lucht bij een dicht uiteinde kan natuurlijk niet bewegen, en geen beweging betekent dat er op dat punt een knoop moet zijn. "Wacht eens even", hoor ik je zeggen, "de speler blaast door dat gaatje, dus trillingen van het riet moeten op een of andere manier door dat 'dichte uiteinde' heen in de buis terechtkomen." Daar heb je gelijk in, maar het antwoord is ja, er is wel enige trilling bij het aanblaaspunt, maar de trilling bij de klankbeker is veel en veel groter, en akoestisch gesproken is het aanblaaspunt een knoop en het open uiteinde een buik.
Laten we nu eens bekijken wat voor patronen van knopen en buiken er in een klarinetbuis mogelijk zijn.



Figuur 14. De eerste twee staande golfpatronen die mogelijk zijn in een cilindrische buis die aan een kant gesloten is (zoals een klarinet).

In figuur 14 zien we eerst de trilling van de grondtoon. Een interessant punt is hierbij dat de golflengte nu *vier* keer de buislengte is, in tegenstelling tot de fluit, waar de golflengte twee keer de buislengte is. De frequentie van de grondtoon van een klarinetbuis met dezelfde lengte als de buis van een fluit zou de helft van de fluitfrequentie zijn – wat verklaart waardoor de klarinet zulke lage tonen kan spelen, ook al is hij niet zo lang.
Hier komt mijn dwarsligger weer – "Hé, hoe zit het dan met de hobo? Wat betreft de lengte verschilt die niet zo erg van een klarinet, bij het aanblaaspunt zit ook maar een heel klein gaatje, maar je kunt er lang zo laag niet op spelen als op een klarinet! Zie je daar maar eens uit te redden!"
Hè, dat is een lastige. Hoe zit het met je hogere wiskunde? Het antwoord is dat de buis van de hobo conisch is, en die van de klarinet cilindrisch (op de klankbeker na). Een wiskundige analyse van een conische buis laat zien dat deze zich in feite gedraagt als een cilindrische buis met twee open uiteinden, en daardoor is de golflengte van de eerste trilling ongeveer gelijk aan twee keer de buislengte, net als bij de fluit.
Waar waren we gebleven? O ja, de volgende knoop in de klarinetbuis. Kijk naar het tweede diagram in figuur 14. Er zit nog steeds een knoop bij het mondstuk en een buik bij de klankbeker, en nu moet er een knoop tussen in. Dat kan alleen op 1/3 van het open uiteinde. De golflengte van de bijbehorende toon moet daarom 4/3 maal de lengte van de buis zijn: nog steeds twee keer de afstand van knoop tot knoop. De frequentie van deze trillingswijze is daarom *drie keer* de frequentie van de grondtoon, oftewel een duodecime (een octaaf plus een kwint) hoger.
Als een klarinet een toon met een frequentie *f* speelt, zijn de enige boventonen die kunnen klinken de oneven nummers uit de reeks harmonischen: *f, 3f, 5f, 7f* ...., of, muzikaal gesproken, c^1, g^2, e^3, bes^3 ....
Dit is te zien in figuur 12d, de analyse van een a van 220 Hz die ik op een klarinet speel. Sommige hogere

even harmonischen komen in feite wel zwakjes voor, maar dat komt waarschijnlijk doordat ik niet zo'n beste klarinettist ben! Als ik echt slecht speel, komen alle even harmonischen zelfs vrij sterk tevoorschijn, waarschijnlijk doordat ik bij het mondstuk geen goede knoop maak.

De boventonenstructuur geeft de klarinet niet alleen zijn specifieke eigen toon, maar geeft je ook de mogelijkheid om de proef op de som te nemen (in het echt deze keer) door naar de toon te luisteren en werkelijk de afzonderlijke boventonen te horen waaruit de toon is samengesteld. In principe zou het ook mogelijk moeten zijn om ze in de toon van bijvoorbeeld de hobo te horen, maar het handige van de klarinettoon is dat het oor ze gemakkelijker kan onderscheiden, doordat de boventonen veel verder uit elkaar liggen.

Wat moet je daarvoor doen? Zoek een aardige klarinettist, vraag hem of haar om flink sterk een lage toon te spelen, daarna de duodecime erboven, en daarna weer de lage toon, en die vast te houden. Met wat oefening kun je de duodecime heel duidelijk door de lage toon heen horen zingen. Als je eenmaal zo ver bent is het ook mogelijk de volgende harmonische te horen, die met vijf keer de grondfrequentie twee octaven en een grote terts boven de grondtoon ligt. Zelf ben ik nog niet verder gekomen dan dit, maar misschien lukt het jou wel.

Wat zeg je? Je spreekt uit principe niet met klarinettisten? Goed, probeer dan dit. Neem de voet van de fluit af en zoek een kurk die het resterende deel van de buis goed afsluit. Je kunt ook een vriend vragen met zijn hand het uiteinde goed af te sluiten. Blaas zachtjes, en je hoort een toon die ongeveer een octaaf lager is dan de gewone lage d. Blaas iets harder, en je hoort de duodecime erboven. Je dwingt de lucht aan het uiteinde een knoop te vormen, en daardoor heb je je fluit veranderd in een namaak-klarinet! Weer kun je met wat oefening de duodecime horen terwijl je de lage toon speelt. Die muziekstudenten lieten zich hierdoor overtuigen, dus ik hoop dat jij dat ook zult doen!

Overigens, blazen op een fluit die aan het uiteinde is dichtgemaakt is een goede manier om te proberen of de kleppen goed sluiten. Zet de voet er weer aan, maak het uiteinde dicht, en als je nu een redelijk duidelijke c onder de gewone lage c (of de b daaronder) kunt blazen, zijn de polsters prima. Als je er op deze manier geen geluid uit kunt krijgen, ren dan niet naar de dichtstbijzijnde reparateur om je fluit opnieuw te laten bepolsteren! Zoek eerst een paar fluitspelende kennissen op en laat het hen ook proberen; het zou ook aan jezelf kunnen liggen in plaats van aan de fluit! Zelfs als niemand die lage toon er uit kan krijgen wil dat nog niet zeggen dat het instrument onbespeelbaar is; het wijst er alleen maar op dat het beter zou kunnen.

[1] Deel V verscheen in FLUIT 2001-1, p. 8-9. De andere delen verschenen in FLUIT 1997-3, 1997-4, 1998-3 en 1999-3. Op de website van de BFS, www.bfs.org.uk/pan.htm, staat de Engelse versie van alle vorige afleveringen. Deel VI verschijnt ongeveer gelijktijdig in FLUIT en in het BFS-tijdschrift Pan.

[2] Zie FLUIT 1999-3, p. 11.

[3] Het freeware-programma dat ik heb gebruikt om tonen te analyseren staat op de website www.hitsquad.com/smm/programs/SPECTROGRAM/. Het programma heet GRAM50 en is heel gebruiksvriendelijk.

Vertaling: Hans Maas