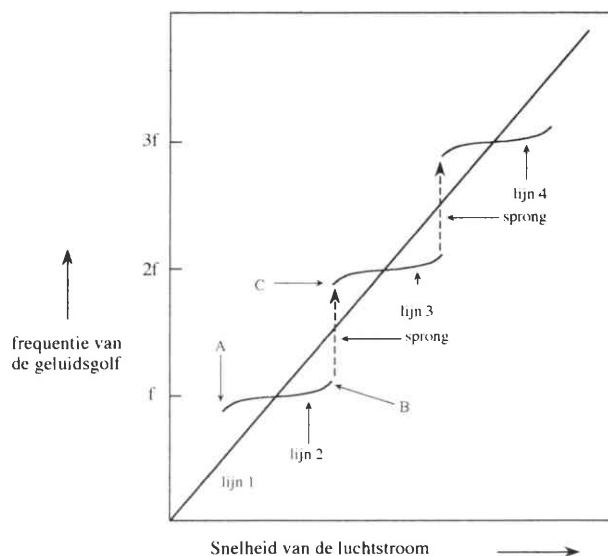


## Buiken, blazen en boventonen: grondbeginselen van de fysica voor fluitisten. Deel III - boventonen en het hoogste octaaf.

In de vorige delen<sup>1</sup> hebben we gezien hoe geluid ontstaat en hoe een resonerende luchtkolom een frequentie van dat geluid kan selecteren en stabiliseren. We zagen ook dat je met één en dezelfde greep door steeds harder te gaan blazen een serie boventonen kunt spelen (bijvoorbeeld  $c^1$ ,  $c^2$ ,  $g^2$ ,  $c^3$ ,  $e^3$ , etc.). Ik ga nu proberen dit verschijnsel wetenschappelijk te verklaren; misschien dat je daardoor meer inzicht krijgt in het probleem van de zuivere intonatie, dat je beter snapt hoe je dit probleem kunt overwinnen, en dat je de logica achter de ogenschijnlijk gecompliceerde grepen van het hoogste octaaf leert begrijpen.

Welnu, als je de creditcard-proef in deel I van mijn artikel hebt uitgeprobeerd, is het je misschien opgevallen dat de toonhoogte van het wigtoontje hoger werd als je harder blies. Experimenteel is aangetoond dat de frequentie evenredig stijgt naarmate de luchtsnelheid toeneemt. In figuur 8 heb ik een grafiek getekend die dit laat zien. Als we op een fluit een wigtoon maken, gebeurt er echter iets heel anders; in plaats van een stijgend 'Swanee-whistle'-geluidje krijgen we alleen bepaalde tonen te horen wanneer we de snelheid van de luchtstroom verhogen. Deze tonen vormen de boventoonreeks van de greep die we op dat moment hanteren. Dat komt omdat een kolom lucht, die alleen op zijn eigen resonantiefrequenties kan meevibreren, 'luistert' naar de wigtoon. De eerste drie van deze resonantie-frequenties worden in figuur 8 op de verticale as getoond als  $f$ ,  $2f$  en  $3f$ . De nagenoeg horizontale lijnen op de hoogte van deze punten laten de werkelijke frequentie zien bij een bepaalde snelheid van de luchtstroom. Er gebeurt iets heel opvallends: beginnend bij een snelheid van de luchtstroom van nul, gebeurt er eerst niets, hetgeen je als fluitspeler niet zal verbazen! Dan verschijnt de laagste toon, maar de frequentie is iets lager dan die zou moeten zijn. Vervolgens stijgt de frequentie geleidelijk tot iets boven  $f$  en springt dan plotseling bijna een octaaf omhoog tot iets onder  $2f$ . Dit patroon herhaalt zich rondom  $3f$ ,  $4f$ , enzovoort. Het hele patroon volgt de rechte lijn die de frequentie van een wigtoon zonder meeresonerende luchtkolom voorstelt.

Wat er precies gebeurt is het volgende. Als je een toon maakt, produceer je een wigtoon die met een beetje geluk niet te ver verwijderd is van de 'juiste' frequentie. Het feedback-effect, waarover ik het in deel I had, neemt de zaak over en trekt de frequentie dicht in de richting van, maar niet noodzakelijk precies tot aan, die juiste frequentie. Waarom niet precies tot aan de juiste frequentie? In een andere



**Figuur 8**  
Deze figuur laat zien hoe de frequentie van een wigtoon verandert als de snelheid van de luchtstroom toeneemt. Lijn 1 toont de frequentie van een wigtoon die uitsluitend door de wig zelf geproduceerd wordt, dat wil zeggen dat er geen resonerende luchtkolom in de buurt is. De gebogen lijnen 2, 3 en 4 laten zien wat er gebeurt als een wigtoon wordt geproduceerd aan het uiteinde van een buis van een fluit of een blokfluit. De luchtkolom in de buis zal alleen gaan resoneren bij, of vlakbij, zijn eigen resonanties (of boventonen) die in de figuur  $f$ ,  $2f$  en  $3f$  genoemd zijn. Er ontstaat daardoor alleen geluid op deze frequenties. De frequentie springt plotseling van de ene harmonische naar de andere als de luchtsnelheid toeneemt. Als één van de boventonen klinkt, stijgt de frequentie (toonhoogte) langzamerhand met een halve toon van begin tot eind als de luchtsnelheid toeneemt.

proef die ik in deel I beschreef, heb je ontdekt dat je fluit duidelijk begon te zingen als je een stemvork bij het blaasgat hield terwijl je de juiste kleppen sloot. De fluit zong ook, maar minder luid, als je de greep van een halve toon hoger of lager pakte. Blijkbaar is de frequentie van de resonantie niet scherp bepaald. Het gevolg is dat de lucht in de buis toch zal gaan resoneren, ook al is de frequentie van de wigtoon niet precies goed. De omvang waarbinnen een resonanseffect optreedt is om en nabij een halve toon.

Als de toon net begint - bij punt A in figuur 8 - ontstaat er als het ware een gevecht tussen de wigtoon, waarvan de frequentie lager is dan  $f$ , en de luchtkolom in de buis, die het liefst vibreert met een frequentie precies gelijk aan  $f$ . Het resultaat is een compromis - de resulterende frequentie zit ergens tussen beide frequenties in. Als de luchtstroom sneller gaat, komen de twee frequenties dicht bij elkaar, maar als de luchtstroom te snel voortbeweegt, ontstaat er - op punt B - een compromis met een te hoge frequentie. Kort daarna is het verschil tussen de frequenties zó groot geworden, dat het compromis beter met de volgende boventoon van de luchtkolom in de buis gesloten kan worden, dus springt de

toon een octaaf omhoog - of, liever gezegd, bijna een octaaf - naar punt C, waarna het hele proces zich weer herhaalt.

### Een experiment

Nu is het een goed moment om dit alles op je fluit uit te proberen. Kies een lage toon. Blaas deze aan, beginnend vanuit niets, en probeer de snelheid van de luchtstroom langzaam maar zeker toe te laten nemen. Luister goed naar het geluid en probeer de tonen die niet zuiver zijn niet te compenseren, zoals je gewend bent als je speelt. Als het goed is kun je de vorm van de curve van figuur 8 volgen. Je kunt nog beter een elektrisch stemapparaat gebruiken, omdat zo'n hulpmiddel gevoeliger is voor verschillen in toonhoogte dan je oor.

Dit experiment zal nog een ander effect laten zien: zelfs als een bepaalde toon met een gemiddelde sterkte gespeeld wordt zal de boventoonreeks niet uit exact zuivere intervallen bestaan. De tweede boventoon zal ongeveer een zuiver octaaf hoger zijn dan de eerste, maar de derde zal een te lage duodecime opleveren, en de vierde een veel te laag dubbel-octaaf. Het hangt er een beetje vanaf met welke toon je precies begint. Het is ook heel instructief om dit experiment met een blokfluit te doen, als je er één hebt, omdat je dan niet onbewust met je embouchure kunt prutsen om de zuiverheid te corrigeren.

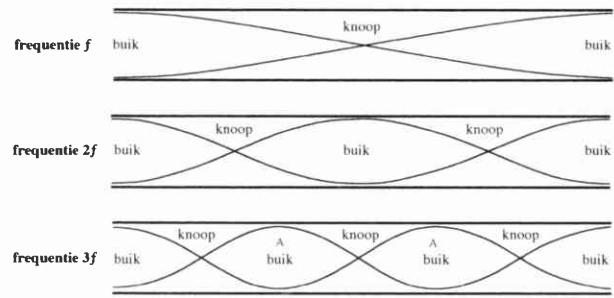
Je zou zo langzamerhand het gevoel kunnen krijgen dat deze wetenschap een beetje raadselachtig wordt, en je zou je kunnen gaan afvragen wat de zin ervan is. Wat we te weten zijn gekomen is dat een fluit, zoals eigenlijk elk blaasinstrument, nooit echt zuiver kan zijn. Er zijn namelijk twee problemen:

(a) Omdat de resonerende buis van een fluit ingewikkeld van vorm is in plaats van een rechte cylinder, zijn de natuurlijke resonantiefrequenties lager dan de eenvoudige natuurkunde voorspelt.

(b) De ingewikkelde wisselwerking tussen de wigtoon (of de riettoon bij andere instrumenten) en de luchtkolom in de buis heeft tot gevolg dat de toonhoogte op een hele natuurlijke manier de sterkte van een toon volgt.

De fluitbouwer lost het eerste probleem op door de boring van de buis aan te passen. Bij moderne fluiten wordt de buis zichtbaar smaller naar de kurk toe (Böhms beroemde curve). Bij oudere instrumenten (en bij sommige moderne piccolo's) is het kopstuk cilindrisch en loopt de rest van de fluit taps toe naar het uiteinde. Daardoor is de tweede boventoon een zuiver octaaf boven de eerste. Het voorkomt ook dat de volgende boventonen vreselijk laag zijn, maar zonder andere hulpmiddelen zijn deze muzikaal toch niet bruikbaar.

Het tweede probleem moet door de speler worden opgelost. Net als bij een blokfluit is een gegeven toon alleen bij een bepaalde sterkte-graad zuiver. Gelukkig kunnen wij daar op een fluit iets aan doen, een blokfluitspeler niet!



Figuur 9

Deze figuur laat de plaats van de knopen en buiken van de eerste drie resonanties in de buis van een fluit zien. Het bovenste diagram is de eerste (laagste) frequentie, met een knoop in het midden en een buik aan elk uiteinde. Het tweede diagram laat de tweede boventoon zien, een octaaf hoger. De knopen zijn verschoven naar een kwart en driekwart van de buislengte en er zijn nu buiken in het midden en aan het uiteinde van de buis. Het derde diagram geeft een duodecime boven de grondtoon weer. Als de fluit in de eerste frequentie,  $f$ , klinkt, zal het openen van een gat op de plek van een buik, die zich op een derde of tweederde van de lengte van de buis bevindt (in het diagram aangegeven met de letter A) tot gevolg hebben dat de frequentie stijgt naar  $3f$ , d.w.z. dat de toonhoogte een duodecime stijgt.

### Grepen van het hoogste octaaf

Een nachtmerrie voor alle beginners, die ingewikkelde vorkgrepen die zo willekeurig lijken als we ze voor het eerst leren! Voor sommigen kunnen ze na jaren nog steeds willekeurig lijken. Toch zijn de meeste van deze grepen heel logisch, en met een beetje natuurkunde kun je ze zo uit de losse pols bedenken, ook al heb je nooit fluit gespeeld!

Waarom zijn deze vorkgrepen eigenlijk nodig? We kunnen de hoge tonen niet als gewone boventonen spelen, want dan zouden ze veel te laag zijn. Is er enige regelmaat in die grepen ontdekken? Ja, bij de meeste wel.

Laten we opnieuw kijken naar het staande golfpatroon in de buis van een fluit. Figuur 9 laat de eerste drie resonanties zien in een buis met een bepaalde lengte. Ik heb de knopen (de punten waar geen trilling is) en de buiken (de punten met maximale trilling) aangegeven.

Welnu, als we ergens in de buis een gat openen, moet er zich op dat punt een buik bevinden. Dus als we ergens halverwege de buis een gat openen en het instrument aanblazen, zal het golfpatroon er uitzien zoals in het tweede diagram en zal de toon een octaaf hoger klinken dan voordat we het gat openen. Dit is wat er gebeurt als we een d of een es spelen en de wijsvinger van onze linkerhand optillen. Het kleine gaatje onder de C-klep bevindt zich ongeveer op de juiste plaats om een buik te vormen. Als je een lage c speelt en je opent de duimklep, klinkt er om dezelfde reden de c van een octaaf hoger. Doordat het extra gat is geopend, is de toon gemakkelijker te produceren en stijgt de toonhoogte een klein beetje in de

goede richting. Dit zijn weliswaar geen echte vorkgrepen, maar ze laten duidelijk het principe zien.

Als we een gat op ongeveer een derde deel van de buislengte openen, zou het golfpatroon op het derde diagram moeten lijken en zouden we een duodecime boven de grondtoon te horen moeten krijgen. Dit gebeurt bijvoorbeeld als we een  $d^3$  spelen. We gaan uit van de grondtoon  $g^1$ , die we overblazen tot de derde boventoon ( $d^3$ ). De C-klep bevindt zich in de buurt van een buik, dus als we die openen krijgen we een  $d^3$ . Tegelijkertijd stijgt de toonhoogte, waardoor de frequentie de juiste waarde dichterbij nadert, zoals je kunt zien als je een elektronisch stemapparaat gebruikt. Jammer genoeg is het nogal ingewikkeld om uit te leggen waarom de frequentie stijgt, maar wat we moeten onthouden is dat als we een gat openen om op de juiste plaats een buik te laten ontstaan, de toonhoogte van de toon iets hoger is dan wanneer we het gat gesloten zouden houden. Het volgende wat we moeten uitzoeken is welke klep we moeten openen voor elke andere toon. Er moet altijd een klep worden geopend op de plaats waar zich een buik bevindt; gelukkig hebben we daarvoor geen rekenmachine en liniaal nodig. We hoeven alleen maar te weten welke andere greep we kunnen overblazen om dezelfde toon te spelen.

Kijk maar eens naar de  $f^3$ . De hoge  $f$  kan gespeeld

worden òf door de greep van de  $f^1$  over te blazen tot de vierde boventoon, twee octaven hoger, òf door  $bes^1$  over te blazen tot de derde boventoon, een duodecime hoger. (Kun je nog een andere mogelijkheid bedenken? Er is er één!) Er moet daarom in de buurt van de klep van je linker middelvinger een buik zijn (dat is bij de  $bes^1$  immers het open einde van de buis). Deze klep moet dus geopend worden als we een hoge  $f^3$  spelen. Voor de hoge  $g^3$  openen we de duimklep, omdat de hoge  $g$  ook als boventoon van  $c^2$  gespeeld kan worden.

De hoge  $e^3$  werkt volgens hetzelfde principe, maar deze toon spreekt, zoals we weten, moeilijker aan dan bijvoorbeeld de hoge  $f$ . De  $e^3$  kan als boventoon van de  $a^1$  gespeeld worden, dus er bevindt zich in de buurt van de bovenste van de twee G-kleppen een buik. Alleen de klep onder de ringvinger van de linkerhand zou open moeten gaan. Op een conventionele fluit met een gesloten gis-klep staat de tweede g-klep echter ook open. Daardoor weet de geluidsgolf niet precies wat er aan de hand is en waar de buik zich precies zou moeten bevinden. Hoewel we de juiste toon krijgen, zijn de akoestische omstandigheden dus niet ideaal, en spreekt de toon moeilijk aan. Een open gis-klep of een e-mechaniek lossen dit probleem op (vergelijk ook Daniël Pailthorpe's bewonderenswaardige artikel in het

