

Buiken, blazen en boventonen: grondbeginselen van de fysica voor fluitisten IV

OVER BOVENTONEN EN HET HOOGSTE OCTAAF

Het intonatieprobleem

Wat bedoelen we met 'zuiver spelen'? De meeste lezers hebben vast en zeker wel eens te maken gekregen met deze eenvoudige vraag. Maar er is geen eenvoudig antwoord op! Om ons op weg te helpen gaan we in dit artikel een paar begrippen onderzoeken en uitleggen. Laten we om te beginnen eens nadenken over de manier waarop muzikale tonen zich tot elkaar verhouden. Dit betekent dat we moeten kijken naar toonladders, want het is al meer dan tweeduizend jaar bekend, dat een muzikale toonladder niet uit een verzameling van willekeurig gekozen frequenties bestaat. In deel I hebben we gezien dat we het octaaf en de kwint tevoorschijn toveren als we spelen met eenvoudige getallen als 2 en $1 \frac{1}{2}$ ($\frac{3}{2}$). Met alleen deze twee intervallen kunnen we kleinere intervallen en een diatonische toonladder maken. Kijk maar naar Blok A.

Blok A

Slangen en ladders volgens Pythagoras - een akoestisch spelletje

Begin met c, ga twee kwinten omhoog (twee stappen van $\frac{3}{2}$ voor de frequentie) en dan weer een octaaf omlaag (de helft van de frequentie). Je komt terecht op d en hebt een 'hele toon' geproduceerd, c-d, met de frequentieverhouding van $(\frac{3}{2} \times \frac{3}{2})/2 = \frac{9}{8}$. Als je hetzelfde vanuit de d doet kom je uit op e, weer een hele toon hoger, en een grote tert op c, met een verhouding e/c van $\frac{81}{64}$! Als je met dit spelletje doorgaat kun je volkomen logisch alle tonen van de majeur-toonladder maken (a is een hele toon op g, b een hele toon op a en f een hele toon onder g). Deze toonladder wordt toegeschreven aan Pythagoras (van de beroemde stelling over rechthoekige driehoeken, weet je nog?). Het interessante is, dat deze toonladder niet precies dezelfde is als de toonladder die je op de piano aantreft. Hij klinkt wel ongeveer gelijk, maar als bijvoorbeeld de c precies zuiver is, wijken alle andere tonen een klein beetje af van de overeenkomstige toon op de piano.

Een andere manier om een toonladder op te bouwen is uit te gaan van frequentieverhoudingen van zuivere intervallen. We kiezen de frequentie van iedere toon zo, dat als we die delen door de frequentie van de grondtoon, dit een eenvoudige getalsverhouding oplevert.

Dit wordt geïllustreerd in Blok B.

Blok B								
Toon	C	D	E	F	G	A	B	C
Frequentieverhouding	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

We kunnen zien dat de d gelijk is aan de d in de toonladder van Pythagoras, maar de e is anders. De verhouding van e tot c is iets kleiner. Ook de a en de b zijn anders.

Wat is het nut van deze toonladder? Dat is, dat je als je een e, f, g of a met de c speelt een prettige, 'harmonisch' klinkende samenklank krijgt. Hoe komt dat?

Figuur 10



Boventonen van c en g

De twee tonen hebben beide g's als boventonen. Als we ze tegelijk spelen en de klank zo prettig mogelijk willen maken moeten de g's precies dezelfde frequentie hebben - volkomen zonder zwevingen. De verschillen tussen de frequenties van andere, dicht bij elkaar liggende boventonen (c en d, de hoge bes, b en c bijvoorbeeld) zijn zo groot (meer dan 100 Hz), dat ze geen hoorbare zwevingen opleveren; als de g's erg dicht bij elkaar liggen ontstaan wel zwevingen.

Welnu, harmonie is een ingewikkelde zaak, maar we kunnen enig idee krijgen door terug te denken aan wat ik in een vorig artikel over boventonen heb gezegd¹. Stel, we spelen tegelijk een c en een g op echte instrumenten, zodat beide tonen boventonen bevatten. Enkele boventonen van beide tonen zijn afgebeeld in figuur 10. Waar de door beide tonen geproduceerde boventonen hetzelfde zijn, zullen de tonen samen alleen prettig klinken, als die boventonen precies dezelfde frequentie hebben. Als ze niet volkomen aan elkaar gelijk zijn zullen ze gaan zweven (zie blok C) in de verschilfrequentie en een ruw bijgeluid produceren. Een eenvoudig rekensommetje leert, dat de gemeenschappelijke boventonen alleen exact dezelfde frequenties hebben als de verhouding van g-c precies $\frac{3}{2}$ is. Hetzelfde geldt voor bijvoorbeeld de grote tert: de zwevingen verdwijnen als de verhouding precies $\frac{5}{4}$ is.

Blok C

Proef 1 – Zwevingen

Benodigheden: je eigen fluit, een tweede fluitist. Speel tegelijk en even sterk heel rustig een lage g (zonder vibrato!!). Een van jullie beiden moet de toon constant houden, terwijl de ander de toon een klein beetje hoger of lager maakt. Als je aan het begin bijna zuiver bent hoor je een langzaam kloppend geluid; dat wil zeggen: de gezamenlijke geluidsterkte zal langzaam op en neer gaan. Als de tonen verder van elkaar komen gaan de schommelingen sneller. Deze schommelingen heten zwevingen. De frequentie van de zwevingen is precies gelijk aan het frequentieverschil van de twee tonen die jullie spelen. Probeer het ook met andere tonen. Als er geen zwevingen zijn spelen jullie volkomen zuiver en ben je het eerste intonatieprobleem de baas.

Deze manier om een toonladder te maken wordt wel de ‘reine stemming’ genoemd, en verschilt zowel van die van Pythagoras als die van de piano. Een interessant kenmerk is, dat de hele toon d-e niet even groot is als c-d: de frequentieverhouding van e tot d is gelijk aan $5/4$ gedeeld door $9/8$, oftewel $10/9$ – geen groot verschil met $9/8$, maar voor een muzikaal ontwikkeld gehoor genoeg om hoorbaar te zijn.

Cents en intervallen

Mensen die geïnteresseerd zijn in stemmen meten intervallen niet in getalverhoudingen maar in cents. Als je rekenen leuk vindt, bekijk dan Blok D. Zo niet, onthoud dan alleen maar dat een octaaf gelijk is aan 1200 cents, en een halve toon op de piano 100 cents. Het handige van cents is, dat je die bij elkaar kunt optellen om grotere intervallen uit te rekenen, in plaats van dat je breuken met elkaar moet vermenigvuldigen.

Een hele toon op de piano is bijvoorbeeld gelijk aan twee halve tonen, dus 200 cents. Een grote tert is gelijk aan vier halve tonen, dus 400 cents, enzovoort. Als je een zakrekenmachientje bij de hand hebt kun

Blok D

Cents en logaritmen

Om de cents-waarde van een frequentieverhouding te vinden moet je de logaritme van de verhouding nemen en deze vermenigvuldigen met 3986. We weten bijvoorbeeld, dat een octaaf de frequentieverhouding $2/1$ heeft. De logaritme van 2 is bijna gelijk aan 0,3010. Vermenigvuldig dit met 3986 en het antwoord is praktisch 1200. De kwint heeft de verhouding $3/2$. De logaritme hiervan is 0,1761. Vermenigvuldig dit met 3986 en het antwoord is ongeveer 702.

je uitrekenen dat c-d in de reine stemming 204 cents is, maar d-e 182 cents! De tert c-e is de som hiervan, $204 + 182 = 386$ cents, wat sterk verschilt van de 400 cents van de piano. Maar volgens Pythagoras’ toonladder is c-e 408 cents – er lijken dus ten minste drie soorten grote tertsen te bestaan!

Waarom heb ik het aldoor over de piano? Omdat aan het stemmen van toetsinstrumenten grote problemen vast zitten. We hebben hier al een voorbeeld van gezien bij de reine stemming. De hele toon c-d verschilt van d-e, dus als we op deze manier een piano zouden stemmen, zou de toonladder van d anders klinken dan die van c.² Ook hebben we kunnen vaststellen, dat de tert van Pythagoras, die uitging van zuivere kwinten, heel wat groter is dan de zuivere tert van $5/4$. En tenslotte willen we graag in verschillende toonsoorten kunnen spelen. In de loop van de eeuwen zijn voor het stemmen van toetsinstrumenten allerlei compromis-oplossingen ontworpen, zoals de ‘middentoon-stemming’. Om alle toonsoorten te kunnen gebruiken, worden de meeste toetsinstrumenten tegenwoordig zo gestemd, dat iedere halve toon gelijk is aan 100 cents, en dan klinkt iedere toonsoort precies hetzelfde. Dit systeem heet ‘gelijkzwevende temperatuur’, en is handig om mee te werken. De meesten van ons raken er aan gewend en zijn er heel tevreden mee, maar als je kritischer gaat luisteren, vooral naar een pijporgel, merk je waarschijnlijk wel dat sommige intervallen

Blok E

Proef 2 – Luisteren naar een grote tert

Benodigdheden: je eigen fluit, een tweede fluitist, een elektronisch stem-apparaat (met een centschaal); een oor dat kritisch wil luisteren (dit kan een derde persoon zijn; misschien is dat zelfs beter).

Het idee is: een grote tert spelen en leren hoe een goede grote tert werkelijk klinkt. Begin met g^2 en b^2 . Stem om te beginnen iedere toon zo goed als je kunt af op het stemapparaat, en houd de tonen samen aan (zonder vibrato!!). Luister goed. Nu moet degene die de g speelt de afwijking op 0 houden, maar de b moet 14 cents lager worden. Houd beide tonen weer samen aan en luister weer. Het interval zal anders en prettiger klinken doordat je de boventonen nu op elkaar afstemt. Als ze precies zuiver zijn en alle grove zwevingen zijn verdwenen heb je de grote tert in de verhouding 5/4 oftewel 386 cents. Je moet dit waarschijnlijk meerdere keren doen voordat je je gehoor geleerd hebt waar het naar moet luisteren.

Als bijverschijnsel van het exact zuiver spelen zul je de verschiltoon van de twee grondtonen horen, en deze moet precies twee octaven lager klinken dan de g . In een later artikel kom ik hier nog op terug.

lelijk vals zijn, dat wil zeggen, de boventonen komen niet overeen! Vooral de tertsen zijn erg slecht.

Zo zijn we dus terug bij wat ‘intonatie’ is en betekent. Er zijn twee soorten intonatie denkbaar. De ene geldt voor als je in je eentje een melodische lijn speelt, de andere voor als je met iemand anders samen speelt. Een onbegeleide melodische lijn (in Westerse muziek) klinkt prima, of je nu volgens de stemming van Pythagoras, de reine stemming, de middentoonstemming of gelijkzwevend speelt. Er zijn aanwijzingen dat zangers volgens Pythagoras zingen. Maar zodra je met iemand anders samen speelt ligt de zaak heel anders, en goed intoneren betekent dan: intervallen maken die aangenaam klinken.

Wat we tot nu toe hebben geleerd

Wat heeft dit alles ons geleerd over zuiver spelen? De allerbelangrijkste les is, dat er niet zoiets bestaat als een unieke verzameling van ‘zuivere’ tonen, op geen enkel instrument. Zelfs op een instrument met kleppen zoals de fluit zal de juiste toonhoogte afhankelijk zijn van waar je mee samenspeelt. Als je lekker bezig bent met *Syrinx* kun je de natuur haar gang laten gaan, en hoef je er alleen maar op te letten dat de intervallen van de opeenvolgende tonen er niet te ver naast zitten. Dat betekent niet dat je slordig kunt zijn, maar dat een reine, Pythagoreïsche of zelfs gelijkzwevende stemming allemaal aanvaardbaar klinken. Vrijwel zeker zul je niet een van deze toonladders gebruiken, je zult eenvoudig af gaan op je

muzikale ervaring. Maar als je met een piano samenspeelt zul je meestal genooddaakt zijn de gelijkzwevende temperatuur te volgen, vooral als je ‘unisono’ (fluit en piano precies dezelfde toon) speelt. De ‘gerekte octaven’ van de piano (Blok F) maken het leven hierbij nog ingewikkelder!

Als je met goede strijkers samenspeelt moet je heel nauwkeurig naar hun tonen luisteren. Met elkaar zullen ze zuiver spelen en waarschijnlijk ‘reine’ intervallen gebruiken, en jij zult je daaraan moeten aanpassen.

Blok F

‘Uitgerekte’ octaven op een piano

Trillende snaren gedragen zich niet precies zoals je volgens de eenvoudige natuurkunde zou verwachten. De boventonen zijn allemaal een beetje hoger dan zou moeten. De tweede harmonische is een tikkeltje hoger dan het octaaf van de grondtoon, de volgende is nog een beetje meer te hoog enzovoort. Een pianostemmer stemt de hoge tonen door de luisteren naar de zwevingen tussen de hoge toon en de boventonen van de toon die een octaaf lager ligt; daardoor worden de hoge tonen steeds iets meer te hoog. De allerhoogste tonen kunnen wel 30 cents afwijken. Dat betekent dat een fluitist om zuiver te blijven met de piano in het hoge register iets aan de hoge kant dient te spelen.

Zuiverheid in het orkest

In het orkest begint iedereen door formeel de a^1 van 440 Hz (of iets hoger) van de hobo over te nemen, maar daarna is het ieder voor zich. Dat klinkt heel vervelend, maar ik bedoel dat ieder instrument niet precies in dezelfde stemming zal spelen. Instrumenten met vrije toonhoogte (strijkers, trombones) zullen waarschijnlijk in de buurt van een reïne of Pythagoreïsche stemming zitten, terwijl instrumenten met kleppen waarschijnlijk meer de gelijkzwevende stemming benaderen. In deze omstandigheden zuiver spelen betekent: je aanpassen aan alles wat er om je heen gebeurt door je oren te gebruiken. Als je bijvoorbeeld een grote tert met de hobo moet spelen, maak hem dan zo goed mogelijk (386 cents), en niet zoals dat gruwelijke 400 cents interval van de piano. Als je een geïoefend gehoor hebt weet je wanneer het goed is. Het heeft geen zin tegen jezelf te zeggen: 'als ik z een fis speel, is hij met het stemapparaat volkomen zuiver', en daar door dik en dun aan vast te houden, want het stemapparaat geeft je de gelijkzwevende stemming in plaats van de 'juiste' toon.

Tonen bijsturen

Het is duidelijk dat we om zuiver te kunnen spelen tonen moeten kunnen bijsturen. Ervaren spelers weten natuurlijk wat ze moeten doen zonder er bij na te denken, maar als je niet zeker weet wat er gebeurt of als je iemand les geeft kan een klein beetje natuurkunde een heleboel helpen.

Voor de exacte bepaling van de toon die uit je fluit komt zijn drie dingen belangrijk (zie deel II en III, FLUIT 97-3 en 97-4):

1. de exacte akoestische lengte van het deel van de buis dat je gebruikt;
2. de geluidssnelheid in de lucht;
3. het feit dat de resonantie in de buis relatief zwak gedefinieerd is.

De akoestische lengte van de buis is de feitelijke lengte (van het mondgat tot het eerste open toongat) plus een klein stukje aan iedere kant, dat bekend staat als de *eïndcorrectie*. Deze correctie hangt af van de grootte van het aanblaasgat en de opening aan het andere uiteinde, waar zich dat ook maar bevindt. Meestal kunnen we aan de opening aan het lage uiteinde niet veel doen, behalve als we een lage cis op de piccolo willen spelen; ik weet zeker dat veel spelers geleerd hebben hun pink om het einde te krullen als het nodig is. Wat we wel kunnen doen is de opening van het mondgat veranderen, hoewel ik verbaasd ben over het aantal mensen dat zich er niet van bewust is (a) dat ze daar voortdurend mee bezig zijn en (b) waarom ze het doen.

De meesten van ons spelen (denk ik) met ongeveer één derde van het mondgat bedekt door de onderlip, en dit levert onder normale omstandigheden de beste benadering van de 'juiste' toonhoogte. Je her-

innert je misschien nog de resonantie-proeven die we gedaan hebben met fles, fluit en stemvork. Ik gaf toen aan, dat je de fles met water moest vullen tot hij iets lager klonk dan de stemvork, en dat je de kop ongeveer 1,5 cm moest uittrekken, om de lucht in de fles en de fluit te kunnen laten resoneren met de stemvork. Dat was nodig, omdat je de opening van de fles bij het aanblazen gedeeltelijk bedekt, waardoor de toon lager wordt, en hetzelfde geldt voor de fluit. Als je de trillende stemvork in de opening houdt is de toon waarmee de lucht kan resoneren iets hoger.

Als je op je fluit speelt kun je de toonhoogte heel nauwkeurig regelen door de mate waarin je het mondgat bedekt te veranderen. Verschillende tonen worden hierdoor in verschillende mate beïnvloed. De cis^2 heeft de kleinste buislengte en wordt daarom het meest beïnvloed door een verandering in de eindcorrectie; met weinig moeite kan hij worden afgebogen van onder de c^2 tot bijna d^2 . De lage c is veel minder te beïnvloeden, omdat de eindcorrectie een kleiner deel van de effectieve lengte is. Hoe je precies de mate waarin je het mondgat bedekt verandert moet je zelf weten, maar ik beweeg zelf het liefst mijn kin naar binnen en naar buiten. De mate waarin het mondgat wordt bedekt is op deze manier goed te beheersen. Misschien draai je liever de kop naar binnen of naar buiten. Het geeft niet hoe je het doet, zolang je (a) weet wat er gebeurt en (b) de zaak in de hand hebt.

Wat gebeurt er in koude (of warme) zalen?

Dit is iets dat ieder van ons van tijd tot tijd voor enorme problemen stelt. Dikwijls vragen mensen 'waarom stijgen blaasinstrumenten in warme zalen?'. Sommigen hebben een beetje natuurkunde gehad en weten dat de buis bij verwarming uitzet, en zijn heel verbaasd dat de toonhoogte niet omlaag gaat! Het is waar dat de buis uitzet, maar dit is maar een heel klein beetje. Wat sterk verandert is de geluidssnelheid.

Als de luchttemperatuur 10 °C stijgt neemt de geluidssnelheid met 1,7% toe. Doordat de frequentie recht evenredig is met de geluidssnelheid, stijgt de resonantiefrequentie van de luchtkolom in de buis met dezelfde 1,7%, wat overeenkomt met ongeveer 30 cents oftewel bijna één derde van een halve toon. Net als ik moeten velen van jullie van tijd tot tijd concerten in koude kerken hebben gespeeld, en vreselijke problemen met de zuiverheid hebben gehad. Nu weet je hoe dat komt!

Wat kun je er aan doen? Nu, je kunt de wetten van de natuurkunde niet veranderen, maar je kunt de gevolgen compenseren door (a) de kop in te duwen of uit te trekken en (b) de mate waarin je het mondgat bedekt veranderen.

Oplossing (a) is tot op zekere hoogte prima, maar doordat we nu weten hoe de lengte de toonhoogte beïnvloedt is het niet moeilijk in te zien, dat tonen die met een korte buis worden gespeeld (cis² enzovoort) sterker worden beïnvloed dan tonen waarbij veel kleppen gesloten zijn. Waar het om gaat is niet de verandering van lengte in absolute zin, maar de verhouding. Je weet misschien nog uit Deel I, dat een toename van 6% van de buislengte de toonhoogte een halve toon doet dalen. Als je de lengte voor de a goed aanpast, laten we zeggen met 2%, dan bedraagt die verandering voor de cis meer dan 2%, en voor de lage c minder dan 2%; het slechte nieuws is dus, dat iedere toon in een andere mate in toonhoogte verandert. Het best is dus altijd een combinatie van (a) en (b), maar uiteindelijk moet je naar iedere toon luisteren en corrigeren wanneer het nodig is. Ik kan dus geen gemakkelijke oplossingen tevoorschijn toveren, maar ik hoop dat je, nu je begrijpt wat er aan de hand is, de situatie beter aan kunt.

Het laatste intonatieprobleem heeft te maken met het derde punt hierboven. In Deel III hebben we gezien hoe het komt dat de toonhoogte verandert met de sterkte, en nu we weten dat dit helemaal door de natuurkunde komt en geen persoonlijke tekortkoming is, kost het ons misschien minder moeite te proberen er iets aan te doen. De oplossingen zijn hetzelfde als in andere situaties die om toonhoogtecorrectie vragen.

Na dit alles hoop ik dat je inziet dat een aantal problemen die we hebben als we fluit spelen direct veroorzaakt worden, of misschien beter gezegd, verklaard kunnen worden, door de Natuurkunde – een schoolvak waar veel mensen een hekel aan hebben.

Het gaat er vooral om, dat je, als je een probleem begrijpt, veel beter in staat bent er iets op te vinden of iemand anders, met name een leerling, te helpen er iets aan te doen.

¹ FLUIT 97-4 (september 1997), p. 5 e.v.

² Nog vervelender is, dat een a, die als sext op c met een verhouding van 5/3 precies zuiver is, met de d van 9/8 een vreselijk valse kwint vormt (vert.).

Vertaling Hans Maas.

Deel I van deze serie verscheen in FLUIT 97-3, Deel II in FLUIT 97-4, en deel III in FLUIT 98-3.

Met dank aan The British Flute Society, dit artikel verscheen in Pan van maart '99.

