DE ZOEKTOCHT NAAR DE SLAGTOON
VERSCHILTOON OF PERIODICITEITSTOON, DAT IS DE KWESTIE

André Lehr

Als U ooit, geachte lezer, in een klokkengieterij een reeks beiaardklokken opgesteld ziet staan, vraag dan een klepel en geef vervolgens in een redelijk hoog tempo ferme tikken op de achtereenvolgende klokken. Ongetwijfeld hoort U dan een mooie chromatische reeks. En dat verwachtte U ook. Maar goed luisterend hoort U bovendien, althans bij de kleinere klokken, een diepe toon als het ware meewandelen, een toon die maar liefst een octaaf en een grote terts onder de grondtoon van elke klok ligt, een grote deciem derhalve. En dat gaat heel netjes, althans als de klokken goed gestemd zijn. Reeds Giuseppe Tartini (1692-1770) had kunnen vertellen wat er aan de hand was. Deze Italiaanse componist en muziektheoreticus had namelijk omstreeks 1714 de *verschiltoon* ontdekt, want dat is namelijk die zoemtoon.

De verschiltoon is een eenvoudig te begrijpen verschijnsel. Stel wij hebben een stemvork met toon a^1, dus met een frequentie van 440 Hz. Stel wij hebben een tweede stemvork die een kwint hoger klinkt, dus met toon e^2 en een frequentie die 3/2 maal hoger is, dus 660 Hz. De verschiltoon is dan 660 – 440 = 220 Hz en dat is precies één octaaf lager dan de a^1. Slaat men beide stemvorken voldoende krachtig aan, dan hoort men derhalve niet alleen de a^1 en e^2, doch bovendien a-klein, dus a^0.

interval	verschiltoon	verhouding
kleine terts c^4-es^4	as^1	6:5
grote terts c^4-e^4	c^2	5:4
kwart c^4-f^4	f^2	4:2
kwint c^4-g^4	c^3	3:2
grote sext c^4-a^4	f^3	5:3
octaaf c^4-c^5	c^4	2:1

Tartini ontdekte het verschijnsel op de viool. Daarom stelde hij in zijn in 1754 verschenen *Trattato di Musica* bij wijze van experiment voor om tussen twee violisten te gaan zitten en hen allerlei intervallen te laten spelen. Er zullen dan verschiltonen te horen zijn volgens de tabel. Daaruit blijkt bovendien dat die lage zoemtoon in klokken klaarblijkelijk ontstaat uit priem en kleine terts.

Maar er is meer dat tijdens het aanslaan van de klokken de aandacht trekt. U zult namelijk ook nog opmerken dat de toonhoogte waarop U de klokken op het moment van aanslag ervaart, de zogenoemde *slagtoon*, niet die van de grondtoon of een van de boventonen is. Toch is er een hechte relatie met een van de boventonen. De toonhoogte van de slagtoon blijkt namelijk altijd één octaafinterval lager te zijn dan de octaafboventoon. Om dit nader toe te lichten wenden wij ons tot de tweede tabel.

In de eerste kolom wordt de gebruikelijke namen voor de boventonen van de klok gegeven. De tweede kolom geeft de ideale klok, de octaafklok zoals die sinds de zeventiende eeuw in beiaarden wordt gebruikt. De derde kolom heeft het gebruikelijke beeld van talloze historische luidklokken. Maar niet van alle, want de derde kolom geeft de toonstructuur van de Van Wou-klokken uit 1505 op de Domtoren van Utrecht.

Wanneer wij ons vervolgens tot de slagtoon in de laatste rij wenden, dan ziet men het opmerkelijke feit dat deze drie klokken alle dezelfde slagtoon bezitten, namelijk een c^2.

Deze valt bij de tweede en derde klok met geen enkele boventoon samen. In feite is de slagtoon dan ook een virtuele toon die in het klankspectrum niet valt aan te tonen, doch daarin wél zijn oorsprong vindt. De slagtoon wordt namelijk in ons gehoor gevormd. Wij komen daar nog op terug.

toonbenaming	**toonhoogte**		
grondtoon	c^1	c^1	bes^0
priem	c^2	b^1	cis^2
kleine terts	es^2	es^2	es^2
kwint	g^2	fis^2	gis^2
octaaf	c^3	c^3	c^3
duodeciem	g^3	g^3	g^3
dubbeloctaaf	c^4	c^4	c^4
slagtoon	c^2	c^2	c^2

Aanvankelijk was er overigens verwarring over de vraag in welk octaaf de slagtoon voorkomt. In het twee gestreept octaaf of wellicht in een ander? Want de Utrechtse klokkenist Jacob van Eijck beweerde in 1633 tegenover zijn vrienden dat de slagtoon, die hij *slach* noemde, identiek is aan de octaafboventoon, dus in het drie gestreept octaaf. Ook François Hemony was die mening toegedaan. In 1879 was het echter de Engelse natuurkundige Lord Rayleigh (1842-1919) die aan de hoogst onzuivere klokken van zijn landgoed Terling vaststelde dat de slagtoon precies een octaafinterval onder de octaafpartiaal ligt. De bekende octaafregel was daarmee geboren. En hij schreef vervolgens: *The reader will not be more surprised at this conclusion than I was, but there seems to be no escape from it.* Inderdaad, want deze conclusie is sindsdien nooit meer aangevochten! Maar begrijpen deed Rayleigh het niet. Een probleem was geboren, want tot ver in de jaren zestig van de twintigste eeuw zou de slagtoon het meest onbegrepen fenomeen van de campanologie blijven. Vele onderzoekers zochten een verklaring, waaronder het idee dat de slagtoon in feite een verschiltoon zou zijn. Maar voor het zover was, deden allerlei andere verklaringen de ronde. Wij zullen ze in het kort opsommen.

De benediktijner pater Johannes Blessing beschouwt op het einde van de negentiende eeuw de slagtoon als een samengestelde toon, want een enkele partiaal kan nooit zo sterk als de slagtoon zijn. Het is overigens een steeds weerkerende vraag hoe de felle slagtoon uit de zachter klinkende boventonen kan voortkomen. Pas veel later zou onomstotelijk blijken dat bij de vorming van de slagtoon inderdaad meerdere boventonen betrokken zijn.

Vervolgens maakte muziekleraar en klokkenadviseur Karl Walter het in 1913 wel heel erg bont. Zijns inziens zou het binnenste van de klok, en dan in het bijzonder de slagring, door de binnen- en de buitenkant van de klok in de frequentie van de slagtoon worden samengedrukt en weer ontspannen. Hij dacht dus aan een compressietrilling. Maar waarom? Zij theorie verdween roemloos in de geschiedenis.

Iets minder bont maakte het kanunnik Peter Griesbacher (1864-1933) te Regensburg, alom bekend en hooggeacht kerkcomponist en tevens klokkenexpert voor Beieren. Want hij had ontdekt dat wanneer met een stemvork de priem gezocht wordt, dus de boventoon die in de buurt van de slagtoon ligt of daarmee zelfs kan samenvallen, bij die zoektocht de aangeslagen stemvork niet alleen de priem laat horen. doch ook *ein eigenartiges, kleinkaliberiges, dünnäderiges, oktavierendes und* […] *quicksendes Klangwesen.* Nochtans, het zo wollig beschreven verschijnsel had alles met falende meettechniek te maken en werkelijk niets en dan ook helemaal niets met de slagtoon. Wij zullen er niet verder op ingaan, want ook Griesbacher moest met zijn hypothese het campanologisch veld ruimen. Neen, het was een probleem voor natuurkundigen en niet voor musici zoals de geschiedenis zou bewijzen!

De eerste natuurkundige die naar de oorsprong van de slagtoon zocht, was de Amerikaan Arthur Taber Jones (1876-1950). Het zou hem vele jaren bezighouden, van 1920 tot 1937. Toch zat er in dat onderzoek nauwelijks enige progressie, want al in 1920 had hij zijn basisideeën geformuleerd. Voor zijn onderzoek gebruikte hij een voorslag van twaalf klokken die de Amerikaanse klokkengieter Meneely in 1919 had gegoten. De zwaarste van de reeks was een es^1 met een gewicht van 1375 kg. Die klokken waren overigens extreem vals, onder andere met een grondtoon die maar liefst een kleine terts te hoog was. In feite waren het dan ook sextklokken. Maar de slagtoon trok zich daar niets van aan, want die lag heel netjes één octaafinterval onder de boventoon het octaaf. Opvallend was echter dat ook de boventonen octaaf, duodeciem en dubbeloctaaf keurig in de pas liepen. Bovendien viel op dat die tonen tijdens de aanslag fel klonken en op dat moment de grondtoon en priem bijvoorbeeld in sterkte overtroffen. Lag daar de sleutel tot de oplossing? En dit temeer omdat dit verschijnsel niet alleen bij deze klokken voorkwam?
Ook tabel 2 laat zien dat elke klok de reeks $c^3 – g^3 – c^4$ bezit. Maar dat is niet verwonderlijk, want die boventonen bezitten vrijwel dezelfde natuurkundige kenmerken, reden waarom ze een hecht drietal vormen zodat de onderlinge intervallen slechts weinig kunnen wijzigen. Vervolgens kan men aan de hand van de eerder gegeven tabel met verschiltonen gemakkelijk vaststellen dat de boventonen $c^3 – g^3$ als verschiltoon een c^2 hebben, terwijl het tweetal $g^3 – c^4$ die eveneens heeft. Kennelijk is die slagtoon c^2 een verschiltoon! Het probleem leek opgelost, maar nauwkeurige metingen van Jones logenstraften dat. De verschiltoon bleek namelijk in zijn klokken door geringe onderlinge afwijkingen tussen genoemde drie boventonen bijna een kwarttoon hoger te zijn dan de slagtoon. De hypothese van de verschiltoon werd door Jones verworpen. Maar wat dan?
Jones kwam met een verklaring die het probleem in feite verlegde, ofschoon dat gevoelsmatig minder het geval leek. Jones immers vermoedde dat de slagtoon een octaafvergissing is. De boventoon octaaf bepaalde weliswaar de toonhoogte van de klok maar omdat daar nog vier tonen onder liggen, zou het gehoor zich telkens weer vergissen met het octaaf waarin die toonhoogte gehoord wordt. Of het hem helemaal bevredigde? Het lijkt van niet, want in latere jaren probeerde hij de theorie van de verschiltoon opnieuw, zij het wederom zonder enig resultaat. Ook andere onderzoekers deden dat, zoals de Duitsers Erwin Meyer en Johannes Klaes in 1933. Zij echter lieten zich misleiden, want de klok waarop zij de verschiltoontheorie beproefden, had toevallig de toonstructuur waarin de slagtoon en de verschiltoon vrijwel samenvielen.
Jones echter liet zich niet misleiden en beproefde daarom andere verklaringen. Zo zocht hij het ontstaan van de slagtoon in het feit dat tijdens de aanslag de klepel heel snel op het klokoppervlak danst, en wel in een frequentie die gesynchroniseerd leek op de halve frequentie van de boventoon het octaaf. Later zou de Nederlander Bert van Heuven (1918-1976) dit in zijn proefschrift uit 1949 overnemen. Maar ook die hypothese werd tenslotte verworpen. Toch was de oplossing van het vraagstuk toen al tien jaar eerder geformuleerd. Gaan wij daarvoor naar Eindhoven.

In 1939 werd op de Lichttoren aan de Emmasingel te Eindhoven een elektronische voorslag gemonteerd. Deze had vier tonen die gevormd werden door veren zoals die ook wel in pendules worden gebruikt. Hun klank werd elektrisch versterkt en bereikte de voorbijgangers derhalve via forse luidsprekers. Maar zij ergerden zich aan de valsheid van een van de veren. Op dat moment werd de toen nog jonge onderzoeker dr. Jan Schouten (1910-1980) erbij gehaald (foto jaren zestig). Hij immers hield zich als Philipsmedewerker bezig met allerlei muzikale en onmuzikale klanken. Allereerst gaf hij naar goed klokgebruik elke veer een naam. Het werden Jumbo, Jericho, Johannes en Judas, waarbij het duidelijk moge zijn dat Judas de valserik was. En de reden leek al snel duidelijk. Hadden namelijk de goede veren onder hun boventonen de relatieve reeks c^2 - g^2 - c^3, een combinatie die door de luisteraar op toonhoogte c^1 werd gehoord, Judas had die fraaie reeks geenszins. En vandaar, zo leek het, had Judas een onduidelijke, valse toon.

Kwam hier de verschiltoonhypothese weer tevoorschijn? Op dezelfde wijze als dat bij een klok van kracht scheen? Schouten echter zocht in een fundamenteel andere richting. Om dat te begrijpen lijkt het goed allereerst een uitstapje te maken naar een toren van waaruit twee luidende klokken te horen zijn. Stel dat de ene klok 60 aanslagen per minuut maakt tegen de andere 65. Het gevolg is dat wanneer beide klokken gelijktijdig starten, ze gaandeweg uit elkaar zullen lopen om na verloop van tijd toch weer bij elkaar uitkomen, dus op hetzelfde moment weer aangeslagen worden. Gemakkelijk is uit te rekenen dat die periode 12 seconden duurt, waarin de grootste 12 aanslagen maakt en de kleinste 13 aanslagen. De klokken samen hebben derhalve een periodiciteit van 12 seconden. Een aanbevolen experiment!

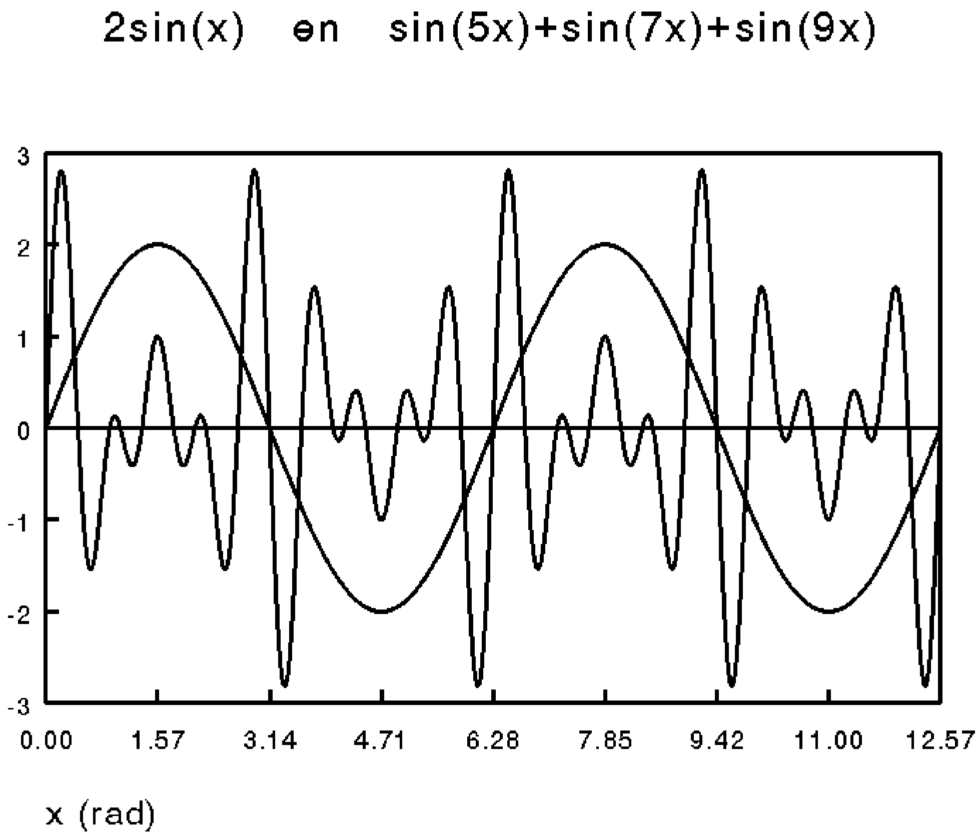
In Schoutens theorie is die periodiciteit het centrale thema. Want iets dergelijks kan ook bij tonen optreden, dat derhalve de frequenties van twee gelijktijdig klinkende tonen een overkoepelnde periodiciteit vormen waarvan de frequentie eveneens als een toon wordt ervaren, ja zelfs dé toonhoogte van de tweeklank vormt. Een voorbeeld van die periodiciteitstoon moge dit verduidelijken.

Stel wij hebben drie tonen met frequenties die zich verhouden als 3:5:7. Stel dat de laagste van het drietal een a^1 van 440 Hz is. Dan zijn de twee andere 733,33 Hz en 1026,67 Hz. Of in tonen a^1, fis^2 en c^3 waarbij zij opgemerkt dat bij de laatste twee kleine afwijkingen zijn weggelaten. De verschiltoon is voor elk tweetal 293,33 Hz of wel d^1. De gemeenschappelijke periodiciteit is echter 146,67 Hz of wel d^0. Die periodiciteit kan men bijvoorbeeld vinden door naar de grootste gemene deler van de drie frequenties te zoeken, dus het grootste getal waardoor de frequenties gedeeld kunnen worden met als voorwaarde een geheel getal als uitkomst. Wanneer men vervolgens de drie tonen gelijktijdig laat klinken en men zoekt naar de toonhoogte van deze samenklank, dan

doet zich een verrassing voor. Want het is niet de verschiltoon d^1 maar de periodiciteitstoon d^0.
Met deze ontdekking oogstte Schouten aanvankelijk weinig succes. Op een lezing tijdens het Internationaal Beiaardcongres in 1972 te Rotterdam, zei hij daarover: *It* [zijn theorie] *is published just before the war. Nobody read it and the people who did read it, did not like it and so, that was that.* Toch zou het deze theorie zijn die tenslotte het slagtoonfenomeen wist te verklaren. Het drietal octaaf c^2, duodeciem g^2 en dubbeloctaaf c^3, heeft namelijk als periodiciteitstoon c^1. Daaruit blijkt natuurlijk niet dat de verklaring met de periodiciteitstoon boven die met de verschiltoon gesteld moet worden. Beslissend was echter dat de waargenomen slagtoon altijd precies samenviel met de berekende periodiciteitstoon en niet met de verschiltoon.
Stond de beiaardwereld te juichen? Geenszins. Pas in 1959 toen Schouten in contact kwam met Joseph Pfundner, klokkengieter te Wenen, zou dat geleidelijk aan veranderen ofschoon Pfundner flink doordraafde. Het ontlokte Schouten zelfs de opmerking dat deze *plus royaliste que le roi* was. Maar in 1965 volgde het echte keerpunt want toen hield Schouten voor het Nederlands Akoestisch Genootschap een lezing over dit onderwerp inclusief elektronische geluidsdemonstraties. De laatste tegenstanders gaven zich toen gewonnen. Niet lang daarna sprak niemand meer over de slagtoon. Het probleem was opgelost en verdween daarmee uit ieders gezichtsveld.

literatuur

André Lehr, *Geschiedenis der Campanologie* (Nationaal Beiaardmuseum, 2000).


2sin(x) en sin(5x)+sin(7x)+sin(9x)
3
2
1
0
-1
-2
-3
0.00
1.57
3.14
4.71
6.28
7.85
9.42
11.00
12.57
x (rad)