HET BEREKENEN VAN EEN KLOKPROFIEL MET BEHULP VAN DE COMPUTER

Dr. André Lehr
(Nationaal Beiaardmuseum, Asten, Nederland)

Inleiding

Wanneer een klokkengieter een nieuw profiel ontworpen heeft, zal hij daar zeker niet onmiddellijk een grote klok van gieten. Want wie garandeert hem dat zijn ontwerp ook inderdaad aan alle technische en muzikale eisen zal voldoen? Vandaar dat hij zal beginnen met een kleine proefklok teneinde aan de hand daarvan zo nodig correcties aan te brengen. En dat zal hij net zo lang herhalen totdat het profiel de gewenste toonstructuur bezit. Pas dan zal hij een grote klok durven gieten. Maar dit alles neemt niet weg dat ook het gieten van kleine proefklokken geld kost; bovendien vraagt het veel tijd. Gelukkig echter kunnen sinds de introductie van de computer beide problemen vermeden worden. In minder dan een uur kan bij wijze van spreken een voortreffelijk profiel ontworpen worden, dus zonder ook maar één proefklok te gieten. Dat is het thema van dit artikel.[1]

Wat eraan vooraf ging

Nadat omstreeks 1640 de Nederlandse klokkengieters François en Pieter Hemony als eersten in de geschiedenis het belang van de boventonen in een klok onderkenden en bij het ontwerpen van hun profielen daar ook daadwerkelijk rekening mee hielden, heeft het niet aan pogingen ontbroken om van een willekeurig profiel die boventonen uit te rekenen. Echt serieuze pogingen werden voor de eerste maal ondernomen door de geniale Leonard Euler (1707-1783), een Zwitsers mathematicus die hoofdzakelijk te Berlijn en Sint Petersburg heeft gewerkt. Dat was in 1764 met zijn *De Sono Campanarum*.[2] Voordien had hij zich overigens ook al bezig gehouden met de trillingen in een staaf en in een ring, zij het aanvankelijk met weinig succes.[3] Pas een tiental jaren laten zou Euler althans voor de staaf de correcte formule weten af te leiden, een bewonderenswaardige prestatie voor die tijd!

In deze context moge het duidelijk zijn dat zijn pogingen om de eigenfrequenties van een klok te berekenen eveneens zouden mislukken. Weliswaar was de wiskunde daar al heel wat beter toe uitgerust dan voordien, doch het ontbreken van een juist inzicht in de wijze waarop een ring of klok tijdens het trillen periodiek deformeert, was één van de oorzaken dat de uitkomst foutief was. Bij een klok moest overigens nog een ander probleem overwonnen worden. Wil men de frequenties kunnen uitrekenen, dan dient het profiel in een wiskundige formule weergegeven te worden. En dat is voor een gecompliceerde vorm als de klok heeft, bepaald geen sinecure, zo niet onmogelijk.

Ook toen honderd jaar later de Engelse natuurkundige Lord Rayleigh (1842-1919) zich met klokken ging bezighouden, was dit een van de struikelblokken. Toch was zijn doel aanvankelijk erg bescheiden, want hij wilde in zijn uit 1890 daterende *On Bells* slechts onderzoeken hoe een klok tijdens het trillen voor de verschillende boventonen vervormt. In eigenfrequenties was hij vooralsnog niet geïnteresseerd. Maar ook voor deze relatief eenvoudige vraag dient de klok in een wiskundige formule te worden weergegeven. Hij kon echter niet veel an-

[1] Alle campanologische kwesties die in dit artikel aan de orde komen, worden uitvoerig behandeld in *Campanologie. Een leerboek over klank en toon van klokken en beiaarden* van de hand van de auteur (Mechelen, 2[de] druk, 1997).

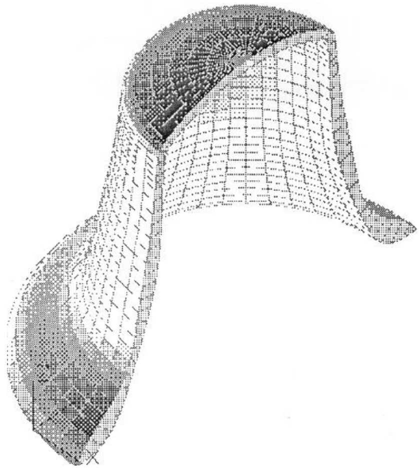
[2] Euler, L., *Tentamen de sono campanarum*. In: *Novi commentarii academiae scientiarum imperialis Petropolitanae*, Tomus X, 1764, p.261-281.

[3] Euler ging ervan uit dat er alleen maar radiële trillingen bestaan en geen tangentiële.

ders doen dan de klokvorm tot een hyperbool met constante wanddikte te versimpelen, één van de kegelsneden waarvoor wél formules beschikbaar waren. Maar de relatie met de realiteit was daarmee volledig verbroken. Later, in 1909, zou de Nederlander Abraham Vas Nunes (1879-1940) dit onderzoek in zijn proefschrift *Experimenteel Onderzoek van Klokken van F. Hemony* nog eens dunnetjes overdoen, zonder daar overigens nieuwe inzichten aan toe te kunnen voegen.[4]

Toen Rayleigh tenslotte toch eigenfrequenties wilde berekenen, moest hij de klokkenvorm nog verder vereenvoudigen, en wel tot een hemisferisch profiel met een geringe en bovendien constante wanddikte.[5] En dat had natuurlijk niets meer met een klok te maken. Maar het was niet de enige versimpeling. Weliswaar wist Rayleigh intussen hoe een klok tijdens het trillen deformeert, doch dat bleek zó gecompliceerd, dat hij daar ook al vereenvoudigingen in moest aanbrengen, althans wilde hij het probleem wiskundig hanteerbaar maken.[6] De consequentie van die benadering was dat hij alleen maar de partialen grondtoon, kleine terts, octaaf, duodeciem enz. vond; hierbij worden de partialen aangeduid met hun gebruikelijke namen, zonder dat de actuele toonhoogtes met deze namen hoeven te corresponderen. De equivalenten van bijvoorbeeld de kwint of de grote deciem bleven door die vereenvoudiging van de theorie onbereikbaar.

In 1950 tenslotte zou de Oostenrijker Hans-Joachim Neumann met zijn te Innsbruck verdedigde proefschrift *Die Biegungsschwingungen eines Kreisringes. Ein Beitrag zur mathematischen Erforschung der Glocken* een laatste poging wagen.[7] Zijn verhaal bleef echter in het speculatieve steken en vormt dan ook geen enkele bijdrage tot het onderhavige probleem. Het was duidelijk, er moest een geheel nieuwe aanpak gekozen worden. En die werd gevonden in de jaren zeventig, toen de computer in het wetenschappelijk onderzoek definitief zijn intrede had gedaan. Daarbij was het een wezenlijke vooruitgang dat dankzij nieuwe rekentechnieken op de computer het klokprofiel niet langer in één enkele formule weergegeven moest worden. Niettemin is de queeste naar die ene universele klokformule onverdroten doorgegaan, een zoektocht die even uitzichtloos als nutteloos lijkt.



Figuur 1: Een halve klok, opgedeeld in elementen.

[4] Vas Nunes, Abraham, *Experimenteel onderzoek van klokken van F. Hemony* (dissertatie Amsterdam, 1909).
[5] Rayleigh werkte men een vlakspanningstoestand.
[6] Rayleigh beschouwde alleen maar de zogenoemde zuivere buigtrillingen, trillingsvormen waarbij het middenvlak door de wand tijdens het trillen noch krimpt noch rekt. Rektrillingen, dus trillingen waarbij dat middenvlak juist wel rekt en krimpt, kon hij weliswaar uitrekenen doch zijn door hun hoge ligging voor een klok geheel oninteressant. De zo belangrijke mengvormen moesten echter buiten beschouwing blijven omdat die wiskundig niet te hanteren waren.
[7] Neumann, Hans-Joachim, *Die Biegungsschwingungen eines Kreisringes. Ein Beitrag zur mathematischen Erforschung der Glocken* (dissertatie Innsbruck, 1950).

De eindige elementen-methode

Een gewone computer kan niets met het klokprobleem beginnen. Dat kan hij pas als een speciaal programma geladen wordt en wel een programma dat volgens de zogenoemde eindige elementen-methode werkt. Daarmee zijn onder andere de eigenfrequenties van allerlei trillende objecten te berekenen, zoals van metallofoonstaven, metalen platen en klokken van elk willekeurig model. Zo'n programma is dus niet uitsluitend voor de klok gemaakt. Men kan ze dan ook gewoon in de handel kopen, zoals onder de merknaam ALGOR bijvoorbeeld. Voor een dergelijk programma is geen vorm te dol. Maar er zijn ook die speciaal zijn toegesneden op objecten met bijvoorbeeld een ronde doorsnede, zoals de klok bijvoorbeeld. Een dergelijk programma onder de naam DYNOPT werd aan de Technische Universiteit te Eindhoven in de jaren tachtig door Dr. Bert Schoofs en zijn medewerkers ontwikkeld. Maar wat houdt de eindige elementen-methode nu eigenlijk precies in?

Uitgangspunt is dat het te berekenen object in een zeer groot aantal blokjes, elementen genaamd, wordt opgedeeld (figuur 1). Bij een klok kunnen dat er vijfhonderd of meer zijn; ze zijn derhalve klein van afmeting. Onderzocht wordt vervolgens wat er tijdens het trillen in elk element gebeurt, zoals rekken en krimpen, en bovendien wat de interactie met de buurelementen is. Die elementen worden bewust klein gekozen omdat de wiskundige beschrijving van de daarin optreden krachten enz. dan betrekkelijk simpel kan blijven. Maar het resulteert wél in duizenden eenvoudige vergelijkingen die elk op zichzelf niet moeilijk zijn,[8] doch door hun groot aantal alleen maar door een computer verwerkt kunnen worden. Aldus worden krachten, vervormingen, trillingen enz. berekend. De rekentijd is door steeds snellere computers geleidelijk aan tot een verbazingwekkend korte tijd gereduceerd. DYNOPT heeft bijvoorbeeld op een geavanceerde Pentium-computer niet meer dan vijf seconden nodig om een klok, hoe groot ook, te berekenen. Voorwaar een prestatie.

Een eindige elementen-programma berekent krachten en trillingen van een object, bijvoorbeeld van een klok. Mocht het resultaat niet goed zijn, dan moet het profiel gewijzigd worden. Het betekent dat elk eindige elementen-programma niet alleen moet kunnen rekenen, maar gekoppeld moet worden aan tenminste een tweedimensionaal CAD-programma, een programma derhalve waarmee op het scherm van de computer het model gewijzigd kan worden, bijvoorbeeld met een dikkere slagring, een hogere schouder of wat al niet. Om vervolgens dit gewijzigde model opnieuw uit te rekenen, eventueel weer te wijzigen, nogmaals te berekenen enz. totdat het gewenste resultaat verkregen is.

Het ontwerpen op de computer

De klokkengieter behoort dus terdege op de hoogte te zijn hoe een klok ontworpen moet worden. Immers, het hier besproken programma berekende aanvankelijk slechts de frequenties van een gegeven profiel. Het is de klokkengieter zelf die de veranderingen in dat profiel aanbrengt. Hij gebruikt daarvoor niet alleen de stemgrafieken van de binnenkant van de klok maar bovendien die van de buitenkant. Voorts dient hij te weten wat het effect is van een aantal profieltransformaties, zoals het naar buiten buigen van de slagring of juist naar binnen, het breder of smaller maken van de flank enz. Evenals de stemgrafieken kan hij die profielwijzigingen vooraf met de eindige elementen-methode berekenen. Hij kan bijvoorbeeld berekenen in welke mate de boventonen verschuiven wanneer de klok 1% hoger wordt gemaakt, 2%, 3% enz., om later, wanneer dat nodig mocht blijken, het juiste percentage te kunnen kiezen.

Met behulp van deze kennis kan de klokkengieter zijn profiel dus zodanig wijzigen totdat tenslotte, zij het na een aantal tussenstappen, het beoogde resultaat verkregen is. Maar, zo vroeg men zich destijds af, is het programma niet zodanig te wijzigen dat het daar zelf toe in

---

[8] Het zijn lineaire vergelijkingen.

staat is? Heeft men bijvoorbeeld een profiel dat nog niet helemaal in orde is, kan dan het programma zelf uitzoeken welke veranderingen nodig zijn? Na de nodige aanpassingen luidde het antwoord tenslotte bevestigend. Het betekent dat een profiel in de computer wordt gebracht tezamen met de gewenste toonstructuur, waarna de computer via vele tussenberekeningen tenslotte bij dat doel zal uitkomen, althans als dat feitelijk ook mogelijk is. Men noemt dit optimaliseren. Een programma als DYNOPT kan dit voortreffelijk.

En wat kan de computer nog meer?

Natuurlijk zal men zich afvragen hoe een profiel, opgedeeld in elementen, in de computer moet worden ingebracht. Een van de manieren is om het profiel, dus de klokdoorsnede, op een willekeurige grootte te tekenen en vervolgens handmatig in het gewenste aantal elementen te verdelen. Daarna worden de coördinaten van elk hoekpunt gemeten, dus de hoogte boven het grondvlak en de straal, dus de afstand tot de klokkenas, om vervolgens die waarden in de computer in te voeren. Het programma op zijn beurt verwerkt deze lijst met coördinaten tot de gewenste tekening, eerst twee dimensionaal en vervolgens driedimensionaal, dus tot een ruimtelijke tekening van de klok.

Maar het kan ook veel sneller en wel door middel van een aangepast CAD-programma. Daarbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat vrijwel elk klokprofiel opgebouwd kan worden uit een aantal rechte lijnen en delen van kegelsneden (cirkel, ellips, parabool en hyperbool). Gewoonlijk wordt alleen met rechten en cirkelbogen gewerkt, hoewel anderzijds in Engeland het gebruik bestaat om bijvoorbeeld het binnenprofiel tot aan de schouder met één ellips te beschrijven. En bij dit alles is het verrassend hoe gering het aantal noodzakelijke bogen is. In heel veel gevallen kan men volstaan met drie cirkels of ellipsen (de slagring in het buitenprofiel en de beide kopbogen) alsmede twee hyperbolen (buitenflank en het gehele binnenprofiel). Heeft men op die wijze het profiel op het scherm getekend, dan kan een hulpprogramma ervoor zorgen dat dit automatisch in het gewenste aantal elementen wordt opgedeeld.

Volledigheidshalve zij nog vermeld dat wanneer een profiel eenmaal in de computer is ingevoerd, het gemakkelijk op elke gewenste grootte door een plotter kan worden getekend.

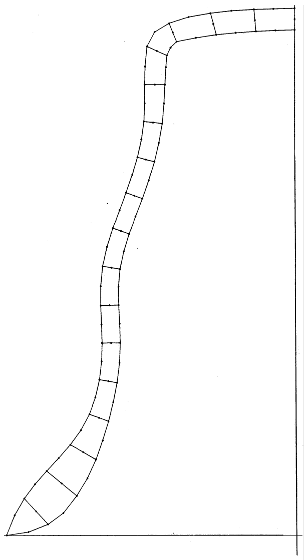
Resumé

Vatten wij thans samen:

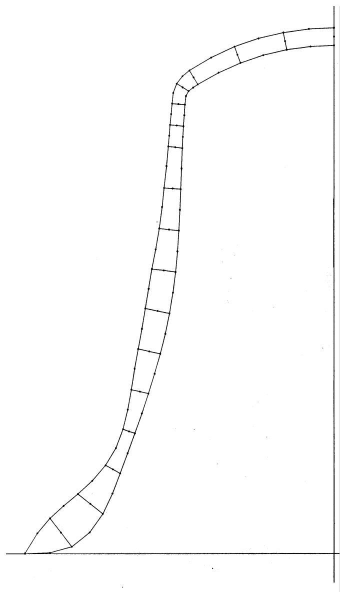
1. De eigenfrequenties van een klok kunnen door een computer moeiteloos uitgerekend worden.
2. Men gebruikt hiervoor een programma dat op de eindige elementen-methode is gebaseerd.
3. Eindige elementen-programma’s zijn in allerlei versies in de handel te verkrijgen.
4. De klok dient voor de computerberekeningen in een groot aantal elementen opgedeeld te worden.
5. Het opdelen in elementen kan zowel buiten de computer op een tekening worden gedaan als in de computer met behulp van een aangepast CAD-programma.
6. Met datzelfde programma kan het profiel op het scherm van de computer op elke gewenste wijze veranderd worden, waarna opnieuw een berekening gemaakt kan worden.
7. Bij het ontwerpen op het scherm wordt gebruik gemaakt van ontwerpregels die vooraf op de computer bepaald kunnen worden. Met name zijn dit stemgrafieken en profieltransformaties, zoals het uitbuigen van profieldelen, wijziging van de hoogte enz.
8. Men kan ook de omgekeerde weg volgen door in het programma een profiel te brengen alsmede de gewenste toonstructuur. Het programma optimaliseert dan het profiel naar dat doel.

De majeur-octaafklok

Het bekendste succes dat met de boven beschreven methodiek werd verkregen was in 1985 de grote terts-klok, dus een klok waarin de kleine terts-boventoon in een grote terts gewijzigd is. Alvorens ons in dit type klok te verdiepen, moet opgemerkt worden, dat in al onze beschouwingen de slagtoon het referentiepunt in het klankspectrum is. Daarbij nemen wij aan dat deze slagtoon altijd een interval van één octaaf beneden de partiaal het octaaf ligt. Wij spreken dus over een kleine terts ten opzichte van de slagtoon en niet ten opzichte van de priem. Maar er is ook nog een andere kwestie.



Figuur 2: De eerste grote terts-klok uit 1985.

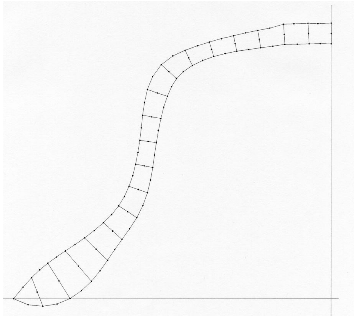


Figuur 3: De grote terts-klok uit 1995.

De hier bedoelde majeurklok heeft de overige partialen in een zeer nauwkeurige ligging, en dat niet alleen voor de laagste vijf partialen grondtoon, priem, grote terts, kwint en octaaf maar ook voor de duodeciem en het dubbeloctaaf. Of anders gezegd, het is niet zo moeilijk een klok te ontwerpen waarvan de terts op een grote terts van de slagtoon ligt, althans indien de overige partialen, en dan met name de grondtoon, afwijkingen van meer dan tien cents mogen bezitten. Maar van een echte majeurklok die ook voor een beiaard geschikt is, dient men te verlangen dat alle partialen binnen een interval van vijf cents nauwkeurig liggen.

Het verhaal is waarschijnlijk welbekend. In 1985 werd voor het eerst een grote tertsklok gevonden die aan bovengenoemde nauwkeurigheidscriterium voldoet. Eigenlijk zou men moeten zeggen dat de computer die klok had gevonden. Het programma kreeg namelijk een mineurklok als uitgangspunt en de opdracht daar een majeurklok van te maken. Geometrisch beperkingen aan het resultaat werden niet opgelegd.[9] Elke vorm die de klok zou aannemen, zou derhalve als een oplossing beschouwd worden. Het resultaat was een uiterst precies getroffen majeurklok met een uitstulping in de flank (figuur 2).

[9] De doelfunctie was derhalve de boventoonstructuur van de gewenste majeurklok; beperkende voorwaarden waren er geen.



Figuur 4: Een grote terts-klok volgens het model van een cimbaal.

Tien jaar later kon de soms als onesthetisch ervaren bult verdwijnen door gebruikmaking van minder voor de hand liggende profielwijzigingen (figuur 3). Intussen kwamen ook andere mogelijkheden voor het voetlicht. Figuur 4 geeft namelijk een totaal andere oplossing. Daarin is de voormalige priem verhoogd tot een kwint en wel door de klokhoogte drastisch te verminderen, terwijl de oorspronkelijke kwint zodanig verhoogd werd dat deze samenvalt met het octaaf. Dankzij die ingrepen was het mogelijk om de oorspronkelijke kleine terts tot een grote verhogen en wel zonder tegennatuurlijke profielvormen te behoeven te gebruiken. Het kon dat ook wel eens zijn dat deze klok dé echte grote terts-klok van de toekomst wordt.

In de goede majeurklok liggen de eerste vijf partialen op hun correcte waarde, dus op $c^1 – c^2 – e^2 – g^2 – c^3$. Maar dat heeft wel zijn repercussies op de partialen boven het octaaf. En vooral geldt dit voor de duodeciem en dubbeloctaaf. Het is namelijk onvermijdelijk dat wanneer het interval tussen terts en octaaf van een grote sext naar een kleine sext verkleind wordt, ook de intervallen octaaf – duodeciem en octaaf – dubbeloctaaf kleiner worden, zij het overigens lang niet zoveel als de terts. Onderstaande tabel maakt dit duidelijk. Intussen is het niet helemaal duidelijk welk effect dit op de klank van de klok heeft.

type	diam.	gew.	grond.	priem	terts	kwint	octaaf	deciem	duodec.	dubbel.
octaafklok	913	458	a	a^1	c^2	e^2	a^2	cis^3	e^3	a^3+
model 1985	1000	695	a	a^1	cis^2	e^2	a^2	cis^3	e^3-	a^3
model 1995	903	404	a	a^1	cis^2	e^2	a^2	cis^3+	e^3-	a^3
model cimbaal	984	391	a	e^2	cis^2	a^2	a^2	f^3	e^3-	a^3

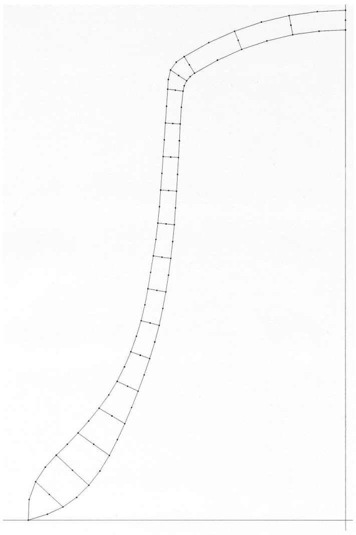
Het zal duidelijk zijn dat in een enkel geval de partiaalnaam niet meer strookt met de toonhoogte. Dat is onder andere het geval bij de zogenaamde kwint a^2 en deciem f^3 van de majeur cimbaalklok.[10] Oorzaak schuilt in het feit dat de kwinttoon waaraan de deciem sterk gekoppeld is, verschoven is naar het octaaf en daarmee allerminst nog de naam kwint verdient.

Varianten van de klassieke mineur-octaafklok

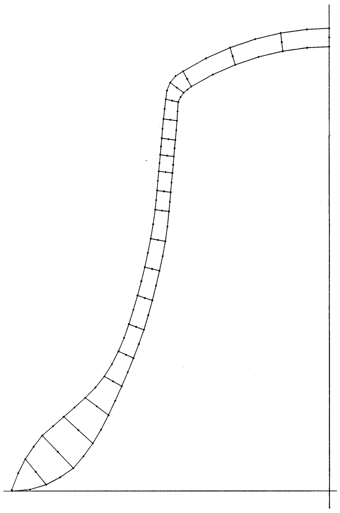
Bij velen bestaat de indruk dat de computer slechts van nut was voor het ontwerpen van een majeurklok. Maar niets is minder waar! Het kan niet vaak genoeg herhaald worden. Een fraai voorbeeld van de betekenis van de computer in andere situaties is de mogelijkheid om daarmee octaafklokken met dezelfde diameter doch verschillende gewichten te ontwerpen. Het gaat dus niet om de bekende trits *leichte, mittlere und schwere Rippe*, waarbij deze klokken weliswaar dezelfde toon bezitten, doch verschillende diameters. Op grond daarvan vari-

[10] Bij sterk afwijkende ligging van partialen kan men die niet langer identificeren met behulp van hun niet vaste toonhoogtes, doch wél op basis van hun onveranderlijke fysische eigenschappen. Met name zijn dit het aantal knoopmeridianen en het aantal knoopparallellen. Het octaaf heeft bijvoorbeeld één knoopparallel en acht meridiaanknopen. De notatie luidt dan I-4. Welke ligging het octaaf ook in het spectrum moge hebben, aan de hand van het aantal knopen is deze altijd te herkennen.

eert in de eerste plaats de wanddikte en daardoor ook het gewicht. Neen, in ons geval bedoelen wij klokken met dezelfde slagtoon a^1 en de dezelfde diameter van 913 mm met als consequentie onderling verschillende profielen. Duidelijk blijkt dat naarmate het gewicht geringer wordt, de klok lager wordt, maar ook meer conisch. Alleen dan blijft de toonstructuur behouden. Iedereen die zich met klokontwerpen bezig houdt, weet dat het ontwerpen van een dergelijke reeks klokken langs de traditionele weg, dus met proefklokken, een uiterst moeizame, zo niet onmogelijk weg zou zijn geweest. Slechts de computer kan hierin uitkomst bieden. Alleen daarmee kunnen talloze profielen snel en efficiënt doorgerekend worden.

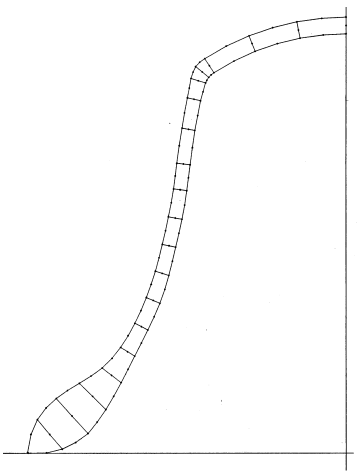


Figuur 5: de klassieke octaafklok

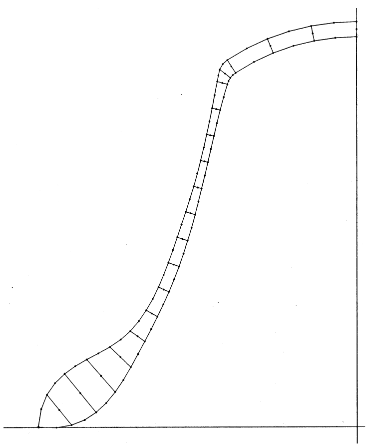


Figuur 6: De eerste variant

octaafklok	hoogte	gew.	grond.	priem	terts	kwint	octaaf	deciem	duodec.	dubbel.
figuur 5	0,80	458	a	a^1	c^2	e^2	a^2	cis^3	e^3	a^3+
figuur 6	0,73	376	a	a^1	c^2	e^2	a^2	cis^3	e^3	a^3+
figuur 7	0,69	348	a	a^1	c^2	e^2	a^2	c^3+	e^3	a^3+
figuur 8	0,63	307	a	a^1	c^2	e^2	a^2	b^2	es^3	as^3



Figuur 7: De tweede variant

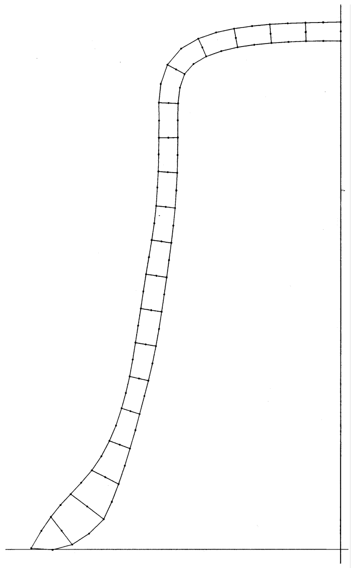


Figuur 8: De derde variant.

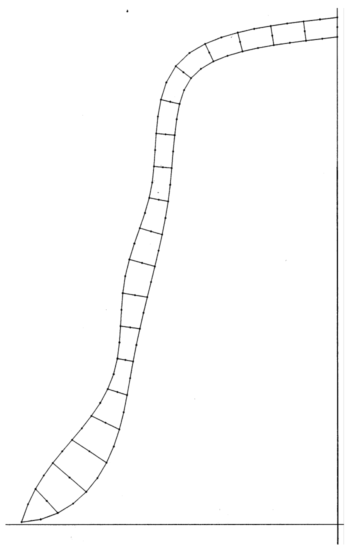
Of deze klokken ook bruikbaar zijn? Afgezien natuurlijk van de traditionele octaafklok in figuur 5 lijken klokken 6 en 7 bepaald wel geschikte kandidaten. Welke klokkengieter durft het aan een proefmodel te gieten?

<u>Niet-octaafklokken</u>

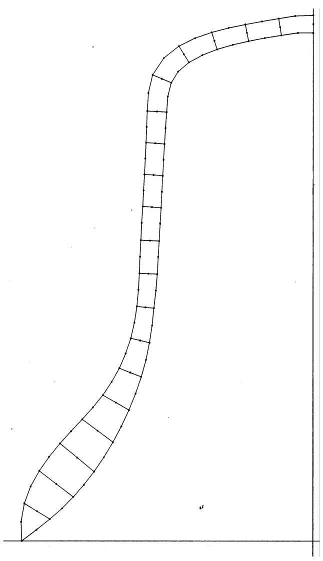
Niet alle klokken zijn octaafklokken; er bestaan ook andere modellen, waarbij de grondtoon met de slagtoon geen octaaf vormt, maar een kwint, sext, septiem of noon. Men spreekt dan van een kwint-, sext-, septiem of noonklok Op dit punt bestaat overigens een enigszins onduidelijke traditie. In elk geval lijkt het zeker dat de eerste klokken van dit type niet een bewuste keuze van de klokkengieters zijn geweest, doch veeleer de consequentie van hun onmacht om een zuivere octaafklok te ontwerpen. Gelijktijdig zal men hebben vastgesteld dat dergelijke klokken zonder bezwaar als luidklok gebruikt kunnen worden en derhalve zeker niet onaangenaam behoeven te zijn, integendeel!



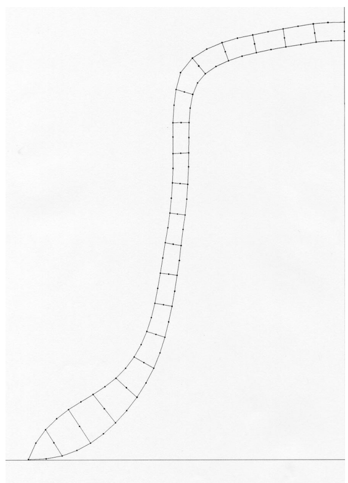
Figuur 9: noonklok 1



Figuur 19: noonklok 2



Figuur 11: mineur sextklok



Figuur 12: majeur kwintklok

Men begrijpt de juistheid van die uitspraak door te bedenken, dat als de toonstructuur van een noonklok, bijvoorbeeld B – c^1 – es^1 – g^1 – c^2 zou zijn, deze inderdaad vals zou klinken indien wij de individuele partialen als *meervoudige* tonen met boventonen zouden beschouwen, zoals snaren bijvoorbeeld. De grondtoon zou dan met de priem en het octaaf onaangename zwevingen geven. Maar in werkelijkheid gaat het hier om *enkelvoudige* partiaaltonen waardoor de grondtoon niet kan zweven met de priem en het octaaf.[11] Bij de beoordeling van een zogenaamd valse klok is het dan ook misleiden dat akkoord op een orgel ten gehore te brengen. Helaas wordt die fout nog al eens gemaakt.

Dit artikel leent zich niet om de niet-octaafklokken uitputtend te behandelen. Wij volstaan slechts met het geven van enkele voorbeelden die met behulp van een computer in minder dan een dag verkregen werden. De tabel geeft de bijzonderheden, waarbij wederom gewezen moet worden op het feit dat de partiaalnamen dikwijls niet in overeenstemming zijn met de ligging van de desbetreffende partiaal in het toonspectrum.

fig. en type	diam.	gew.	grond.	priem	terts	kwint	octaaf	deciem	duodec.	dubbel.
5: octaafklok	913	458	a	a^1	c^2	e^2	a^2	cis^3	e^3	a^3+
9: noonklok 1	973	602	g	a^1	c^2	d^2	a^2	b^2	e^3	a^3
10: noonklok 2	994	623	g	c^2	c^2	e^2	a^2	c^3	e^3-	a^3
11: mineur sextkl.	952	652	c^1	g^1	c^2	g^2	a^2	dis^3	e^3	a^3+
12: majeur kwintkl	937	403	d^1	a^1	cis^2	g^2	a^2	dis^3	e^3-	a^3

De in figuren 9-12 en de tabel gegeven klokken zijn slechts een keuze uit vele mogelijkheden. Talloze varianten zijn te bedenken waarbij de profielen evenzeer variëren als de daaraan gekoppelde diameters en gewichten. Men zal overigens opmerken dat in de gegeven voorbeelden zelfs een majeur kwintklok voorkomt. Waarbij de zwak klinkende kwint-partiaal naar een kleine septiem ten opzichte van de slagtoon is verhoogd. Dit komt omdat de grondtoon een kwint verhoogd werd. Beide tonen zijn sterk aan elkaar gekoppeld.

De tweede noonklok heeft twee bijzonderheden. Enerzijds de uitgestulpte flank, als ware het een majeurklok die ze beslist niet is, en anderzijds het feit dat de priem tot de hoogte van de kleine terts is verschoven en daarmee dan ook samenvalt. Of het allemaal ook bruikbare profielen zijn? Verder onderzoek zal dat moeten leren, ofschoon de algemene stelregel dat vloeiend verlopende profielen ook een goede klank opleveren, zeker mag worden gehanteerd.

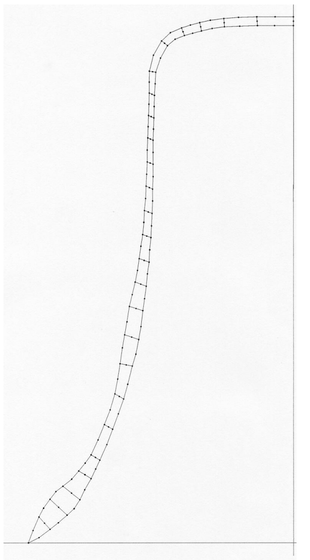
De orkestklok

Een laatste voorbeeld is de mogelijkheid om de computer bij het ontwerpen van een orkestklok te gebruiken. In vele orkestwerken kunnen ze gebruikt worden, zoals in de *Symphonie Fantastique* van Berlioz bijvoorbeeld. Tijdens de *Songe d'une nuit de sabbat* zijn twee klokken nodig, met de slagtonen g en c^1. Echte klokken zouden 5500 en 2300 kg wegen en zijn daarmee onbruikbaar voor een orkest. De enige oplossing is dan de klok te verdunnen waardoor ze enerzijds veel kleiner moet zijn maar bovendien veel lichter wordt. De auteur herinnert zich nog het moeizame proces toen hij in 1954 voor het eerst orkestklokken ontwierp. Meerdere proefmodellen waren nodig en achteraf bezien werd zeker niet het optimale model verkregen. Hoe veel eenvoudiger kan dit de computer waarvan figuur 13-15 en de tabel het resultaat geeft.

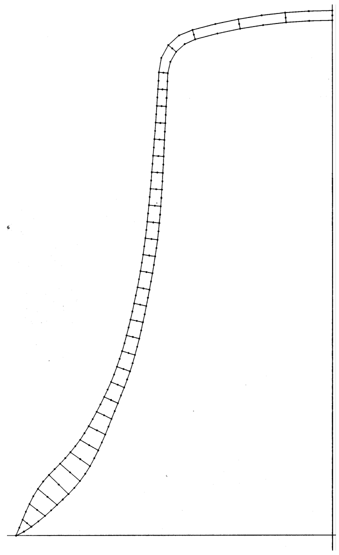
fig. en type	diam.	gew.	grondt.	priem	terts	kwint	octaaf	deciem	duodec	dubbel.
13: mineurklok	610	91	a	a^1	c^2	e^2	a^2	c^3	e^3-	a^3
14: majeurklok	624	93	a	cis^2	cis^2	e^2	a^2	cis^3+	e^3-	a^3
15: kwintklok	146	1	a^2	e^3	a^3	e^4	a^4	b^4	e^5	a^5

[11] Het gaat hier dus om het feit dat grondtoon, priem en octaaf gezamenlijk dan wel twee aan twee niet binnen de kritieke band liggen.

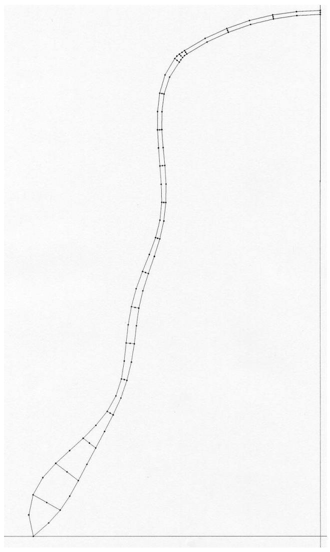
Bij de tweede klok is weer het beproefde recept toegepast waarbij de priem samenvalt met de terts die tot een grote werd verhoogd. Maar veruit de interessantste orkestklok is de kwintklok die enerzijds een nog al merkwaardige vorm heeft, doch anderzijds een opvallend regelmatige boventoonreeks. Afgezien van de zwak klinkende deciem op b^4 is er uitsluitend sprake van kwinten en kwarten. Deze regelmatigheid introduceert een zogenoemde periodiciteitstoon die in ons gehoor wordt gevormd. Deze klok klinkt namelijk op a^1, dus een octaaf lager dan de grondtoon. Aldus is ook de geringe afmeting en gewicht te verklaren. Het lijkt het ultieme antwoord op de orkestklok, dankzij wederom de computer.



Figuur 13: De mineurorkestklok



Figuur 14: De majeurorkestklok



Figuur 15: De kwint orkestklok

Zo maar een praktisch hulpmiddel

Ons loflied op het gebruik van de computer in de klokkengieterij is zeker niet ten einde. Hij kan voortreffelijk gebruikt worden wanneer van een beiaard of gelui bestaande klokken door nieuwe vervangen moeten worden of nieuwe klokken als uitbreiding van de reeks daaraan moeten worden toegevoegd. In die gevallen is het natuurlijk erg belangrijk dat de betrokken klokkengieter die de oude profielen onvoldoende kent op zijn computer daarmee kan experimenteren alvorens de klokken volgens dat andere profiel ook daadwerkelijk te gieten. Zeker, men zou kunnen tegenwerpen dat het slechts een kwestie is van de bestaande profielen op te meten. Maar afgezien van het feit dat dit buitengewoon nauwkeurig dient te geschieden, wil men althans zeker van het resultaat zijn, speelt anderzijds maar al te dikwijls een rol dat bij uitbreiding profielprogressie moet worden toegepast en derhalve niet volstaan kan worden met het simpelweg op schaal vergroten of verkleinen van dat profiel.

Een andere belangrijke toepassing is het stemmen van een klok. Want niet alleen kan met de eindige elementen-methode op de computer de stemgrafieken bepaald worden, doch bovendien kan men de computer gebruiken om het effect van een bepaalde stemsnede vooraf te onderzoeken. Vooral in riskante situaties waarin na het aanbrengen van een stemsnede geen weg meer terug is, is dat een wezenlijk hulpmiddel. Maar er is meer, want men kan de computer ook laten uitzoeken welke stemsneden noodzakelijk zijn om een bepaald doel te bereiken. Mits het programma daarin voorziet,[12] is een simpele opgave van de gewenste toonwijzigingen voor de betrokken partialen voldoende om als antwoord de sneden te krijgen waarmee dat resultaat daadwerkelijk verkregen zal worden.

Conclusie

Het moge duidelijk zijn dat voor een klokkengieter die meer dan één klokprofiel wil voeren en bovendien profielen waarmee hij geen ervaring heeft of die nog ontworpen moeten worden, de computer met een eindige elementen-programma onontbeerlijk is geworden. Zowel zijn flexibiliteit als zijn mogelijkheden zullen daarmee in vergelijking tot zijn voorgangers met sprongen toenemen.

[12] In dat geval dient een moduul voor lineair programmeren in het programma te zijn opgenomen.