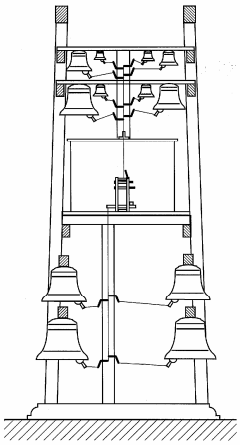
LEERBOEK DER CAMPANOLOGIE

Een verhandeling over muzikale en technische aspecten
van luidklokken en beiaarden

Dr. André Lehr



derde druk 2007
Nationaal Beiaardmuseum
Ostaderstraat 23 – NL-5721 WC Asten
info@carillon-museum.nl
SBN 90-807553-6-2

1 VOORWOORD

Nadat de auteur in de jaren vijftig en zestig van de vorige eeuw een cursus campanologie had mogen geven aan leden van de Adviescommissie van de Nederlandse Klokkenspel-Vereniging, alsmede aan leerlingen van de Nederlandse Beiaardschool te Amersfoort en de Koninklijke Beiaardschool 'Jef Denyn' te Mechelen, leek het een logisch vervolg deze voordrachten in een *Leerboek der Campanologie* te laten resulteren. Dit werd in 1976 door het Nationaal Beiaardmuseum te Asten uitgegeven. Jaren later werd het gevolgd door het zeer uitvoerige studieboek dat onder de titel *Campanologie. Een Leerboek over Klank en Toon van Klokken en Beiaarden*, dat in 1996 (2de druk 1997) door de Koninklijke Beiaardschool 'Jef Denyn' te Mechelen werd uitgegeven. Toch bleef behoefte bestaan aan een meer eenvoudige en op hoofdzaken gerichte verhandeling. En bovendien zonder wiskundige formules, hoewel juist daarmee in bondige termen erg veel te zeggen is. Aldus kwam de uitgave uit 1976 opnieuw in beeld. De vanzelfsprekend geheel bijgewerkte tweede druk verscheen in 2003. Thans ligt de derde druk voor u. Daarin zijn de noodzakelijke correcties aangebracht en is het boek bovendien aangevuld met de nieuwste inzichten in onder andere de slagtoon en de grote terts-klok.

André Lehr

Asten, februari 2007
alehr@planet.nl

2 INLEIDING

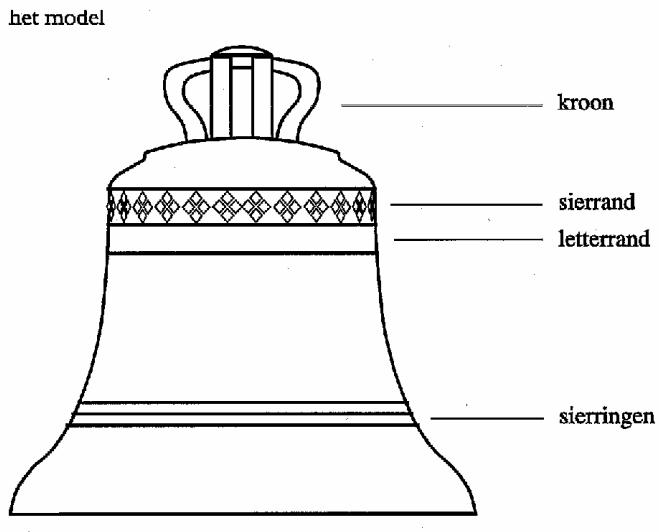
2.1 Doel van het boek

Campanologie is de wetenschap die zich bezighoudt met klokken en beiaarden. De naam werd afgeleid van het Latijnse woord *campana* dat klok betekent. In feite zou men dus ook van klokkenkunde mogen spreken. Doorgaans wordt dat echter vermeden, om verwarring met uurwerken te voorkomen.

Vanzelfsprekend omvat de campanologie alle facetten van klokken en beiaarden. Zo kan men bijvoorbeeld deze studie toespitsen op de geschiedenis van de klok, op de betekenis van de klok in de samenleving enz. In dit boek zal onze aandacht echter uitsluitend uitgaan naar de technische en muzikale aspecten van klok en beiaard. Het gaat dan om het vormen en gieten van de klok, de akoestische eigenschappen, de wijze waarop hierin optimale resultaten te bereiken zijn, de mechanische inrichting (de tractuur), kortom al die zaken waar zowel de klokkengieter als de adviseur zich om moet bekommeren.

Het zal het duidelijk zijn dat deze verhandeling niet opgesmukt kan worden met interessante verhalen en gebeurtenissen waar de beiaardwereld zo rijk aan is. Evenmin zullen de huidige technieken en opvattingen over klank en toon vanuit de geschiedenis benaderd worden, hoe verhelderend dit ook kan zijn. Over beide aspecten immers bestaat reeds literatuur. Wij verwijzen daarvoor naar de literatuurlijst (hoofdstuk 12).

2.2 Enkele definities en begrippen



Figuur 1: Het model van de klok.

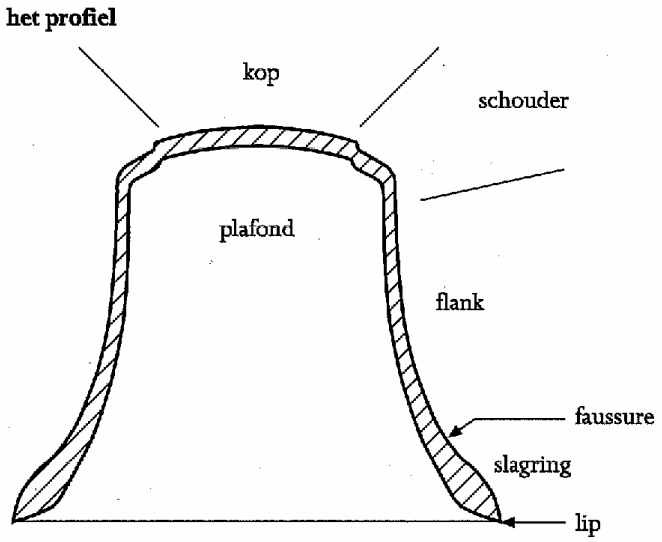
Een klok is een rond schaalvormig lichaam, gegoten volgens een bepaald profiel in klokkenbrons en bedoeld om een muzikale klank voort te brengen. Men onderscheidt het model van de klok (fig.1) dat de globale vorm weergeeft en het profiel dat de (halve) doorsnede is (fig.2). De overgang van de bolle slagring naar de holle flank, het buigpunt, wordt aangeduid met het Franse woord *faussure*.

Vele klokken bezitten een kroon waaraan ze opgehangen kunnen worden. Verschillende delen van de klok hebben een algemeen aanvaarde naam gekregen. Deze zijn in figuur 1 genoteerd. De grootte van de klok wordt altijd aangeduid met de grootste *diameter*, de onderdiameter dus. *Klokkenbrons* is een legering of alliage die in hoofdzaak bestaat uit 80% koper en 20% tin. De *slagtoon* van een klok geeft

haar toonhoogte aan. De slagtoon is doorgaans één octaaf hoger dan de grondtoon van de klok. Later, in hoofdstuk 4.6, zal een meer correcte definitie van de slagtoon gegeven worden. Overigens moet opgemerkt worden dat in muziek voor beiaard de klokken gewoonlijk één octaaf lager genoteerd worden, dus volgens de grondtoon.

De laagst klinkende klok in Nederland heeft een slagtoon e (e-klein); in België is dat f (f-klein). De hoogst klinkende klokjes zijn uit het zesgestreept octaaf. Om de gedachten te bepalen, een c^1-klok heeft een doorsnede van 156 cm bij een gewicht van 2310 kg; een c^2-klok bezit een diameter van 78 cm en een gewicht van 290 kg; een c^3-klok meet 39 cm en weegt 36 kg.

Een klok kan tot klinken worden gebracht door middel van een *klepel*. Dit is een bol- of peervormig lichaam uit ijzer of messing dat bevestigd aan een ijzeren staaf in de klok wordt opgehangen. Ook kan ze tot klinken worden gebracht door middel van een *hamer* aan de buitenzijde. De plaats van aanslag is steeds het dikste deel van de slagring. Er is geen verschil in klank tussen de binnen- en buitenzijde.



Figuur 2: Het profiel van een klok.

Een *luidklok* is een klok die heen en weer schommelend aan een as door een heen en weer zwaaiende klepel aangeslagen wordt. Een *speelklok* of *beiaardklok* daarentegen hangt vast en onbeweeglijk aan een balk. Ze behoort tot een serie klokken die tezamen een toonreeks vormen. Men spreekt al naar gelang het aantal klokken van een *voorslag* (18 klokken of minder) dan wel bij meer dan achttien van *klokkenspel*, *beiaard* of *carillon*. Een speelklok wordt vanuit een klavier door middel van een klepel aangeslagen dan wel vanuit een automaat door middel van een hamer.

3 HET VORM- EN GIETPROCES

3.1 Algemene beschrijving van het proces

Wil men een klok of een ander voorwerp in brons of ijzer gieten, dan dient men de beschikking te hebben over een lege ruimte die omgeven is door vuurvaste wanden waarvan de vorm nauwkeurig overeenkomt met het model van het te gieten voorwerp c.q. klok. Voor het vervaardigen van een dergelijke gietvorm kan de gieterij uit verschillende technieken kiezen.

A. Het te gieten voorwerp wordt allereerst in was gemodelleerd. Vervolgens wordt deze wassen vorm ingekapseld in vuurvast materiaal (bijvoorbeeld chamottemeel vermengd met water en een verharder). Na verharding wordt die vorm in een oven geplaatst en gedurende meerdere dagen op 600^0 C verhit. Het resultaat daarvan is dat de was uit de vorm is gelopen en de vorm gebakken. Hiermee is een ideale gietvorm verkregen. Deze methode, die bekend staat onder de naam *verloren was-techniek* (cire perdue), wordt tegenwoordig vooral bij kleiner beeldhouwwerk en plastieken toegepast.

B. Van het te gieten voorwerp wordt allereerst een model in hout of ander bestendig materiaal gemaakt. Dit model wordt afgedrukt in een vochtig kleihoudend zand. Na het wegnemen van het model wordt het zand gedroogd waardoor het verhardt en het water verdreven wordt. Vervolgens kan erin gegoten worden. Deze *zandvormmethode* vindt vooral haar toepassing in de techniek.

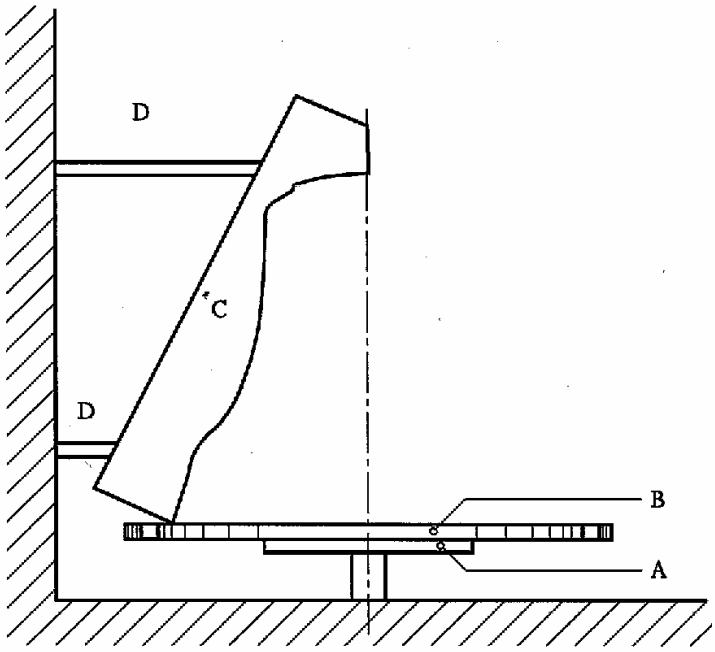
C. Indien van een bepaald voorwerp grote aantallen nodig zijn, kan men een permanente gietvorm uit staal vervaardigen. In tegenstelling met de voorafgaande methoden blijft deze vorm ná het gieten behouden en kan derhalve steeds opnieuw gebruikt worden. *Deze coquilletechniek* wordt in de eerste plaats voor massa-artikelen gebezigd.

Vanzelfsprekend bestaan er talloze varianten op de voorafgaande technieken. De klok bijvoorbeeld wordt gegoten volgens een werkwijze die aan A ontleend werd, althans in de Europese gieterijen op het vasteland. De Engelse klokkengieters namelijk bezigen een methode die duidelijke verwantschap met techniek B bezit. Maar ook onder de vastelandsgieters bestaat geen volstrekte eensgezindheid. Er zijn dan ook meerdere varianten op A volgens welke een klok gegoten kan worden. Anderzijds zijn de onderlinge verschillen toch weer zó gering dat in het navolgende slechts één daarvan in extenso besproken behoeft te worden. Maar één verschil kan niet onvermeld blijven. Vele gieters werken tegenwoordig in cementzand, maar er zijn ook nog gieters die leem als vormmateriaal gebruiken. Sommigen menen dat dit een verschil in klank oplevert. Maar of dit werkelijk zo is, bleef tot nog toe onbewezen.

3.2 De werkopstelling

Op een *draaitafel* A (fig.3) zoals ook pottenbakkers wel gebruiken, wordt een metalen *vormplaat* B gelegd. Op deze vormplaat wordt de gietvorm geleidelijk opgebouwd.

In de eerste plaats heeft men daarvoor nodig een *trekmal* of *sjablone* van de binnen- en buitenzijde van de te gieten klok. Deze mal wordt vervaardigd uit hout, ijzer- of aluminiumplaat. Die van de binnenzijde is in de schets met C aangeduid. Men ziet dat de mal de halve profiellijn van de binnenkant van de klok aangeeft. Uiteraard worden de mallen aan de

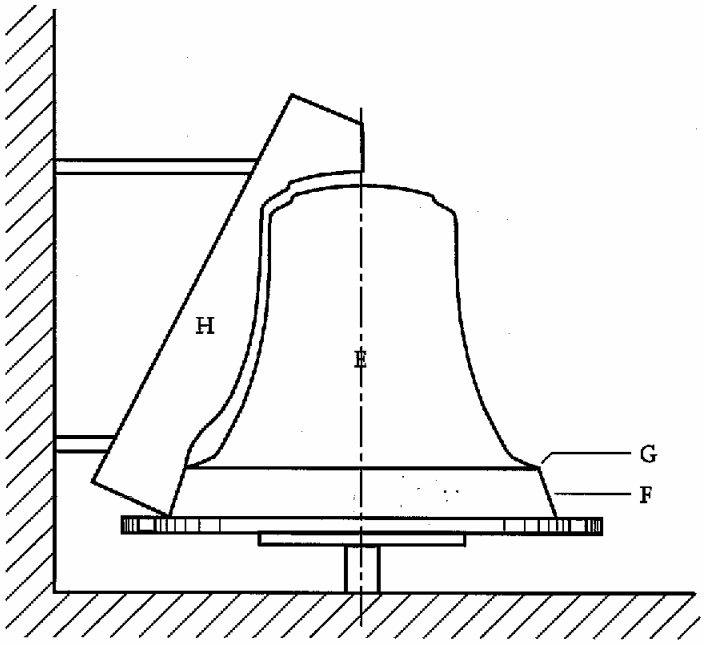


Figuur 3: De werkopstelling.

hand van tekeningen vervaardigd. Hoe een klok ontworpen wordt, een kwestie waarbij vooral muzikale problemen een rol spelen, zal in 4.7 behandeld worden.

In figuur 2 is de binnenmal door middel van ijzeren staven D in een vaste opstelling met de muur verbonden. Vanzelfsprekend zijn daarbij de maten zodanig gekozen dat de gegoten klok de juiste afmetingen zal krijgen.

Daarbij moet men rekening houden met het feit dat klokkenbrons tijdens het afkoelen 1% krimpt, dat wil zeggen dat alle maten van de gegoten klok 1% kleiner zullen worden dan het model. Vanzelfsprekend wordt dit aspect niet alleen tijdens het tekenen van het profiel in de beschouwingen betrokken, doch evenzeer bij het afstellen van de mal. In concrete termen, een klok die 700 mm doorsnede moet krijgen, zal op 707 mm gevormd worden. Alle overige maten worden daarmee in verhouding gekozen.



Figuur 4: De kern.

3.3 De kern

Beschouwen wij nog even figuur 3. Indien op de vormplaat B tijdens het ronddraaien van de draaitafel A zand wordt toegevoerd, zal de binnenmal C ervoor zorgen dat er een vormstuk ontstaat volgens een negatief model van de te gieten klok. In figuur 4 is deze *kern* met letter E aangeduid.

Om ervoor te zorgen dat te zijner tijd alle vormstukken goed passen, d.w.z. bij het in elkaar zetten van de gietvorm ten opzichte van elkaar niet zullen verschuiven, wordt gelijktijdig met het maken van de kern een zoge-

naamde *sluitrand* F gemodelleerd. De toekomstige klok begint derhalve op punt G. Voor meerdere bijzonderheden over dit aspect zij verwezen naar 3.7.

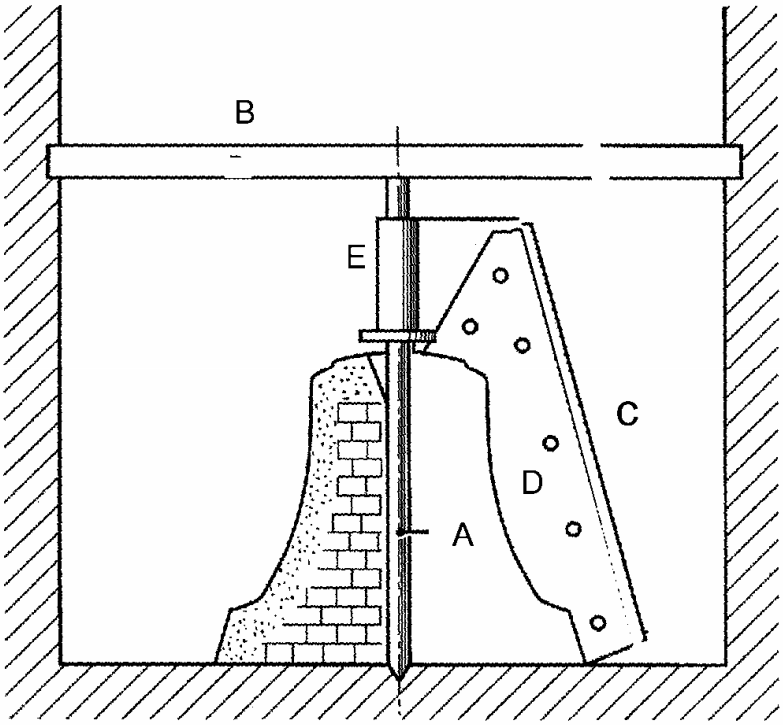
Voorheen werd de kern in hoofdzaak uit leem vervaardigd. *Leem* is een kneedbare massa die afgezien van het water voornamelijk bestaat uit zeer fijn zand (circa 60%) en klei (circa 40 %). Daar leem tijdens het drogen opvallende en vooral storende krimpverschijnselen toont, moet het altijd vermagerd worden, zij het natuurlijk zonder de sterkte aan te tasten. Een welbekend vermageringsmiddel was paardenmest!

Heden ten dage wordt door de beide Nederlandse klokkengieterijen in plaats van leem cementzand gebezigd. Vandaar dat men ook wel spreekt over de *cementzand-vormmethode*. De samenstelling van het *cementzand* is weinig anders dan die welke bij bouwwerken wordt toegepast: mager en fijnkorrelig zand zonder verontreinigingen (bijvoorbeeld maaszand of zilverzand) met maximaal 10% hoogwaardige cement en tenslotte water voor de verharding. Ook wel gebruikt men fijn zand met een synthetische verharder, bijvoorbeeld furaanhars.

Het zal duidelijk zijn dat bij grote tot zeer grote klokken de draaischijf niet meer gebruikt kan worden. De gewichten zijn daar te groot voor. Om die reden wordt voor klokken met een gewicht van meer dan 2000 kg de opstelling uit figuur 5 gekozen.

Een centrale spil A is zowel in de vloer als aan balk B bevestigd. De laatste is met zijn uiteinden in de muren vastgemaakt. Hiermee is een hechte opstelling verkregen. De uitvoering is overigens zodanig dat spil A en balk B na het voltooien van de gietvorm verwijderd kunnen worden.

Aan spil A is een houder C gemaakt waarop mal D werd geschroefd. De houder en daardoor de mal, kan door middel van bus E om de spil draaien. Aldus heeft men een tegengestelde situatie met die uit figuur 3. Dáár draaide de vorm en bleef de mal onbeweeglijk; hier staat de vorm stil en wordt de mal om die vorm bewogen. Beide leiden vanzelfsprekend tot hetzelfde resultaat. Wel biedt die uit figuur 5 juist voor grote vormen een aantrekkelijk voordeel. Men is min of meer gedwongen de kern hol te modelleren, en dan natuurlijk bij voorkeur om een kleinere stenen kern. Deze holle ruimte kan later, wanneer de vorm ten behoeve van het gieten gedroogd moet worden, gebruikt worden om er een vuur in aan te leggen. Wij komen daar in 3.7 nader op terug.

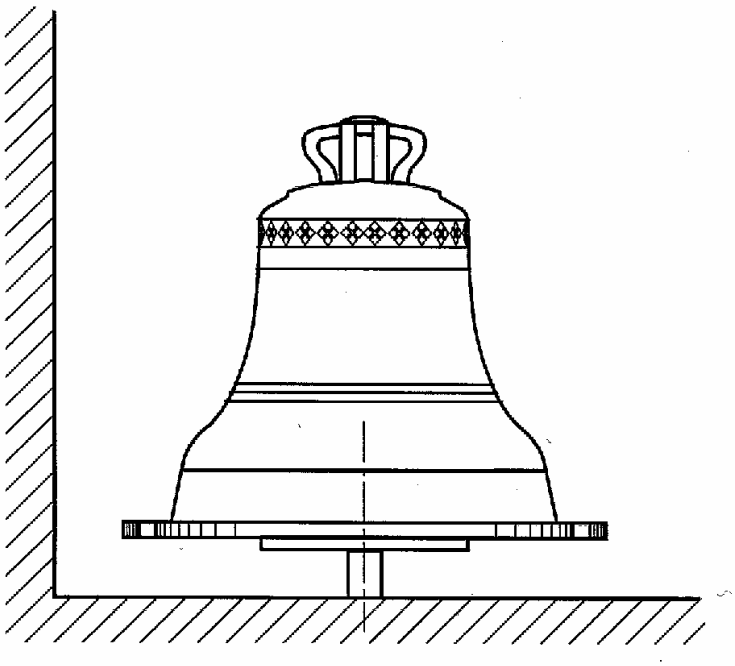


Figuur 5: De opstelling in de gietkuil.

Wanneer de kern klaar is, kan men de binnenmal verwijderen en de buitenmal daarvoor in de plaats stellen. Men krijgt dan een situatie zoals die in figuur 4 geschetst werd: tussen de buitenmal en de kern bevindt zich een open ruimte die precies het profiel van de klok aangeeft. Deze opening vormt het uitgangspunt voor het modelleren van de zogenoemde *valse klok*.

3.4 De valse klok

De valse klok is een bedrieglijke kopie van de te gieten klok, vandaar de naam *valse klok*. Die kopie heeft men nodig om van de toekomstige klok een negatief te kunnen maken waarin het brons gegoten moet worden. Een kind aan het strand doet in feite hetzelfde. Zijn metalen zandvormpjes zijn de negatieven van de zandtaartjes die hij bakt. Uit figuur 4 blijkt duidelijk op welke wijze de valse klok gemaakt moet worden. Tijdens het ronddraaien van de vormplaat waarop de kern reeds staat, zal bij toevoer van zand de buitenmal H ervoor zorgen dat een klok van zand ontstaat. Daar de valse klok slechts een tijdelijke functie heeft, behoeft voor dit onderdeel geen cementzand toegepast te worden. Een kleverige zandsoort is in feite voldoende. Gebruikt wordt daarom het zogenaamde Brusselse vormzand, een zandsoort met enkele procenten klei. Maar ook andere materialen zijn denkbaar. Daar de toekomstige klok vooral aan de buitenzijde zo glad en zo gaaf mogelijk moet zijn, wordt over de zandklok een dun laagje was aangebracht. Ook dit kan weer het gemakkelijkst gedaan worden met behulp van de buitenmal. Nogmaals draait de vormplaat, terwijl dit maal van bovenaf vloeibare was over de zandklok gegoten wordt. De buitenmal doet de rest. Gelijktijdig kan men dan de horizontale sierringen op de valse klok aanbrengen (fig.6). Men behoeft daartoe slechts op de geëigende plaatsen in de buitenmal een kerfje aan te brengen. Op de waslaag zullen die als een verhoging rondom de klok met het profiel van dat kerfje verschijnen.



Figuur 6: De valse klok.

In dit stadium is de valse klok, de kopie in zand en was van de toekomstige klok, op de versiering, de belettering en de kroon na gereed. Zowel de ornamenten als de letters worden vooraf in metalen of houten letter- en versieringmatrijzen uit was vervaardigd. Overeenkomstig het door de opdrachtgever verstrekte opschrift worden vervolgens de wassen letters op de valse klok geplakt. Bij de versiering wordt op soortgelijke wijze gewerkt. Wel moet er-

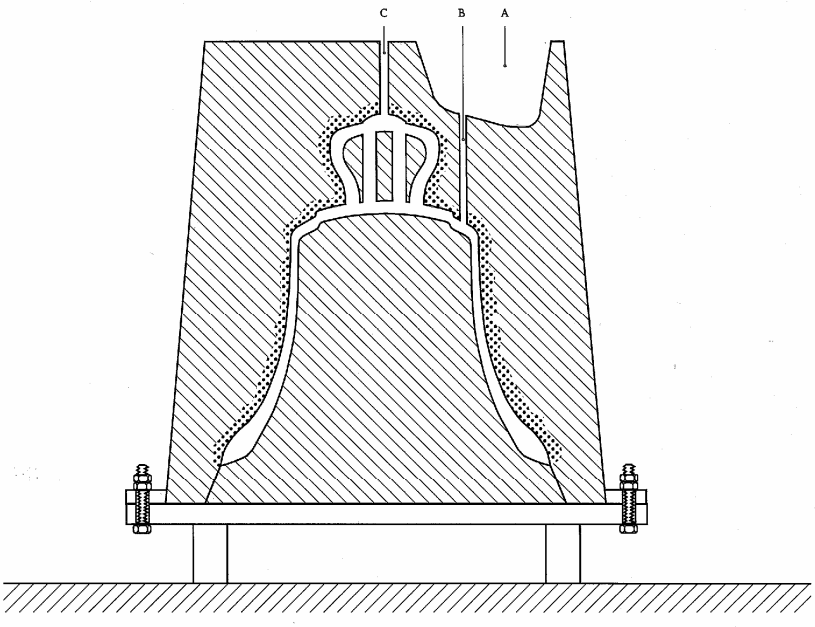
op gewezen worden dat men rondom de klok altijd een repeterend ornament aanbrengt. Bij een klok met onderdiameter van 70 om bedraagt de bovenomtrek circa 130 cm. Stelt men verder dat men ornamenten heeft ter lengte van 13 cm, dan impliceert dit dat over die omtrek tien gelijke stukjes versieringen geplakt worden. Het zal overigens duidelijk zijn dat men dikwijls met delen van een ornament moet werken teneinde een sluitende band te verkrijgen. Tenslotte zij nog opgemerkt dat zowel de versieringen als de letters doorgaans niet door klokkengieters ontworpen worden. Het is gebruikelijk en ook juister dat dit door beeldhouwers en letterontwerpers wordt gedaan.

Rest tenslotte de kroon, het samenstel van armen waaraan de klok straks opgehangen wordt. Ook deze kan vooraf in was gemodelleerd worden en pas daarna op de valse klok geplaatst. Figuur 6 toont dit op instructieve wijze. Vroeger echter werd de kroon geheel afzonderlijk gevormd en pas vlak voor het gieten in de klokkenvorm opgenomen. Ook kan men het kroonmodel uit een bestendig materiaal vervaardigen, zoals een aluminiumlegering bijvoorbeeld. Noodzakelijk is dan echter dat dit model zodanig ontworpen is, dat het vóór het gieten uit de klokkenvorm genomen kan worden om aldus ruimte vrij te maken voor het vloeibare brons. Zoals uit figuur 6 blijkt, voldoet het daar geschetste model in geen enkel opzicht aan die eis. Die kroon moet dan ook in was gemaakt worden

In figuur 6 is de gereedgekomen valse klok getekend. De buitenmal en de daarbij behorende houders zijn inmiddels verwijderd. Deze immers zijn niet meer nodig. De volgende stap zal dan ook het maken van een negatief van de buitenkant van de valse klok moeten zijn.

3.5 De mantel

Na het gereedkomen van de valse klok kan de vorm gevoeglijk van de draaitafel genomen worden en elders in de gieterij geplaatst. In figuur 7 is hij op enkele stenen gezet. De valse klok met haar details aan letters en vooral versieringen zal in een vuurvast materiaal afgedrukt moeten worden. Men spreekt dan van de *mantel*. Voorheen werd daarvoor een fijne leemsoort gebruikt; thans meer en meer chamottemeel. Beide ontlopen elkaar niet veel. Chamotte is namelijk leem dat op een zeer hoge temperatuur gebrand werd. Het is daarom vuurvast. Chamottemeel is fijn gemalen chamotte. Vermengd met cement en water vormt het een uit-



Figuur 7: De gietvorm.

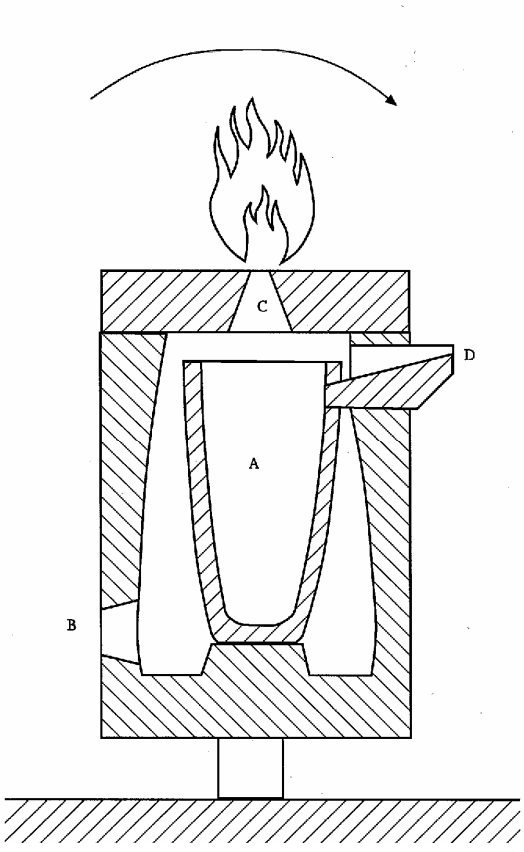
stekende pap waarmee de valse klok ingepenseeld kan worden. In figuur 7 is de aldus verkregen laag van enkele centimeters dik met puntarcering aangegeven.

Na het verharden van deze vuurvaste afdruklaag moet vanzelfsprekend de nodige versteviging aangebracht worden. Tijdens het gieten zal het vloeibare brons namelijk tegen de chamottelaag drukken. Zou deze openbarsten, dan zou niet alleen al het werk tevergeefs zijn geweest, doch bovendien kans op ernstig letsel voor de gieters niet denkbeeldig zijn. De noodzakelijke versteviging wordt verkregen door de gehele vorm in een stalen mantel op te sluiten. Daarbij wordt de ruimte tussen de chamottelaag en de mantel met cementzand stevig aangestampt. Vroeger en bij grote vormen nog altijd werd de vorm in een zogenoemde gietkuil geplaatst waarbij de open ruimte rondom de vorm met aarde werd opgevuld.

Natuurlijk dient men tijdens het opstampen van de vorm erop te letten dat kanalen worden vrijgehouden waardoor later het vloeibare brons in de vorm kan lopen en terwijl door andere de daarbij optredende gassen kunnen ontwijken. In figuur 7 zijn dit de gietkom A, het gietkanaal B en het ontluchtingskanaal C (*opkomer* of *windpijp* als de doorsnede klein is).

Eenmaal zover in het vormproces gekomen zullen de kern en de mantel rustig de tijd moeten krijgen om te verharden. Dit duurt ongeveer een week. In die tijd kunnen wij een kijkje nemen bij verschillende typen smeltovens.

3.6 De smeltoven

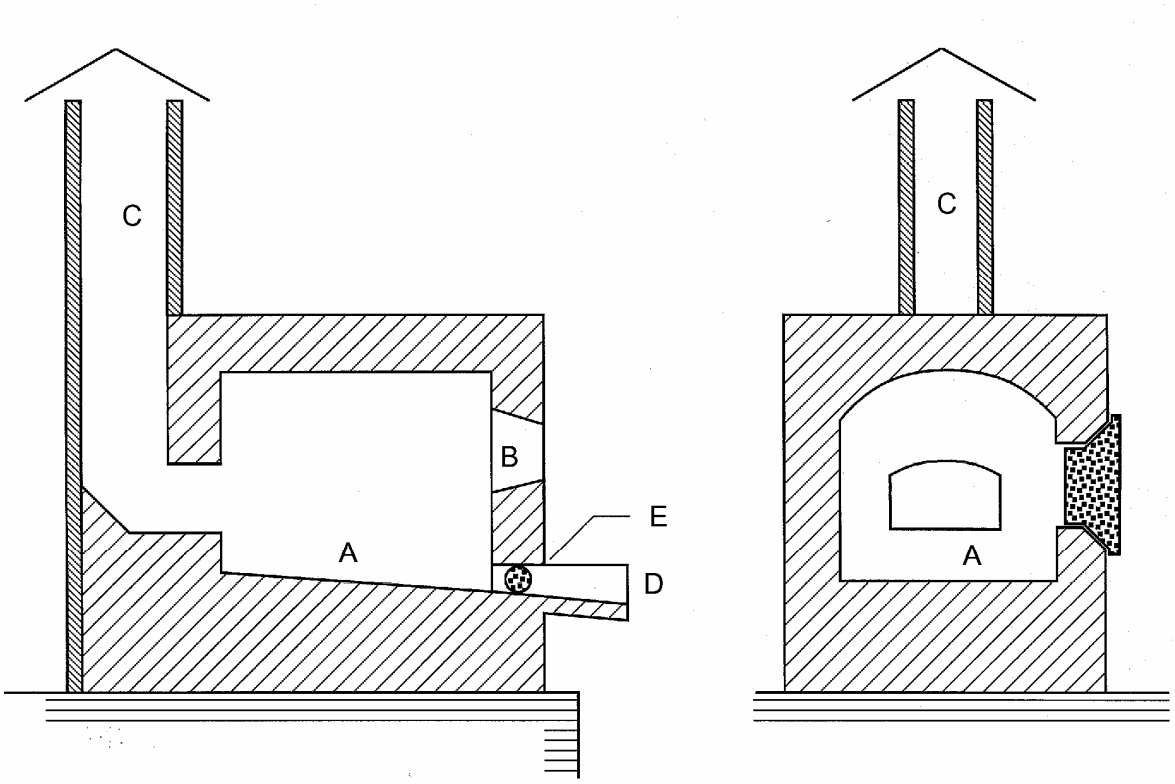


Figuur 8: De kroesoven.

De klok wordt gegoten van brons en wel in een samenstelling van ongeveer 79% koper, 19% tin en 2% andere metalen (zoals zink, lood enz.). Deze legering die *klokkenbrons* of klokspijs wordt genoemd, bewerkstelligt de fraaiste klank. Waarom dit zo is, zal in 4.13 nader uiteengezet worden. Klokkenbrons smelt bij 900^0 C. Bij die temperatuur mag echter niet gegoten worden. De vloeibaarheid is dan te gering om scherpe afdrukken te verkrijgen. Pas bij 1100^0 C is dat wel het geval.
Wanneer de gieter geen oude gescheurde klokken behoeft om te smelten, betrekt hij uit de handel zogenoemde *broodjes* klokkenbrons met afmetingen van ca. 30 x 10 x 10 cm. Deze broodjes dienen in een oven gesmolten te worden. In beginsel beschikt men daartoe over twee typen, namelijk de *kroesoven* voor hoeveelheden van 500 kg en minder en de *vlamoven* voor grotere gewichten.
Het principe van de kroesoven is in figuur 8 in doorsnede geschetst. Kroes A is de eigenlijke smelthaard. Deze is van een vuurvast materiaal vervaardigd, bijvoorbeeld van gra-

fiet. De kroes is in een ruimte geplaatst die is opgebouwd uit chamottestenen. Bij opening B wordt in een juiste verhouding olie en lucht onder druk naar binnen gedreven. Wanneer dit mengsel wordt aangestoken, zullen de vlammen rondom de kroes cirkelen en tenslotte door opening C de oven weer verlaten. Aldus wordt de oven in betrekkelijk korte tijd op hoge temperatuur gebracht en vervolgens het daarin liggende klokkenbrons gesmolten. Als vuistregel kan men met twee tot drie uur rekenen.

Wanneer het brons eenmaal de giettemperatuur bereikt heeft, wordt de oven met behulp van een motor volgens de richting van de pijl gekanteld. De daarvoor noodzakelijke voorzieningen zijn in de tekening weggelaten. Het vloeibare brons loopt dan uit ovenmond D in een met leem beklede ijzeren gietpan welke eronder wordt gehouden. Met behulp van een takel wordt vervolgens die gietpan naar de vorm gebracht waarna er gegoten kan worden. Tussen het uitgieten van het brons en de beëindiging van het gieten zal in het algemeen niet meer dan een kwartier mogen liggen. Overigens, wanneer de smeltkroes niet al te groot is, wordt deze tevens als gietpan gebruikt en derhalve met speciaal gereedschap tijdelijk uit de oven getild.



Figuur 9: De vlamoven.

De vlamoven waarvan in figuur 9 eveneens het principe getekend is, wordt doorgaans voor grotere hoeveelheden brons gebruikt. Bij dit type heeft men de kroes laten vervallen. Het brons wordt namelijk gesmolten op bodem A van een vuurvaste ruimte, gemetseld uit chamottestenen. Bij opening B wordt weer olie en lucht onder hoge druk naar binnen gedreven en

zal al brandende over de op vloer A opgestapelde broodjes klokkenbrons strijken om daarna in de schoorsteen C te verdwijnen. Het smelten zelf gebeurt niet omdat de vlammen het brons verwarmen, want het is de stralingswarmte van het plafond die het smeltproces mogelijk maakt. Soms ook wordt de oven zodanig gebouwd dat er een forse natuurlijk trek in ontstaat. Hout is dan de brandstof.

Na ongeveer vier tot zes uur zal het brons gietklaar zijn. In de ovenmond D wordt dan de lemen prop E weggestoten waarna het vloeibare brons naar buiten stroomt. Gewoonlijk wordt het in een gietpan opgevangen. Zijn de hoeveelheden echter bijzonder groot, bijvoorbeeld meer dan 3000 kg, dan kan de mond D verlengd worden tot aan de gietvorm. Er is dan sprake van een gietkanaal. In dit geval is de vorm natuurlijk lager geplaatst dan de oven. Deze staat dan in een zogenoemde *gietkuil*.

Het smelten van metalen is bepaald niet alleen een kwestie van verhitten. In de vlammen bevinden zich allerlei gassen die door het vloeibare brons opgenomen kunnen worden. In de gegoten klok manifesteert zich dit als porositeit. Wij komen daar in 3.9 en 4.13 nader op terug. Ook kan men bij een overmaat van zuurstof, dus meer dan noodzakelijk is om de olie te verbranden, het brons geoxideerd worden en dan met name het koper. Het veroorzaakt in het ergste geval een brijachtige en taaie smelt die nauwelijks te vergieten is. In al die gevallen kan de klank ernstig geschaad worden. Van oudsher wordt daarom het brons tijdens het smelten tegen de vlammen beschermd. Vroeger geschiedde dit bijvoorbeeld met zand of glas dat als een dik vloeibare massa (*slak*) op het gesmolten metaal dreef en het daarmee van de vlammen afsloot. Thans bestaan er allerlei synthetische slakken die bij leveranciers van gieterijbenodigdheden betrokken kunnen worden.

3.7 Het gietklaar maken en het gieten

Wanneer het cementzand voldoende verhard is, worden kern en mantel tijdelijk van elkaar gescheiden (fig.10). De mantel wordt derhalve van de kern gelicht. De valse klok gaat daarbij verloren. Deze immers werd uit zand en was opgebouwd. Bezwaarlijk is dat geenszins, want de valse klok heeft zich afgedrukt in de mantel en daarmee haar taak verricht.

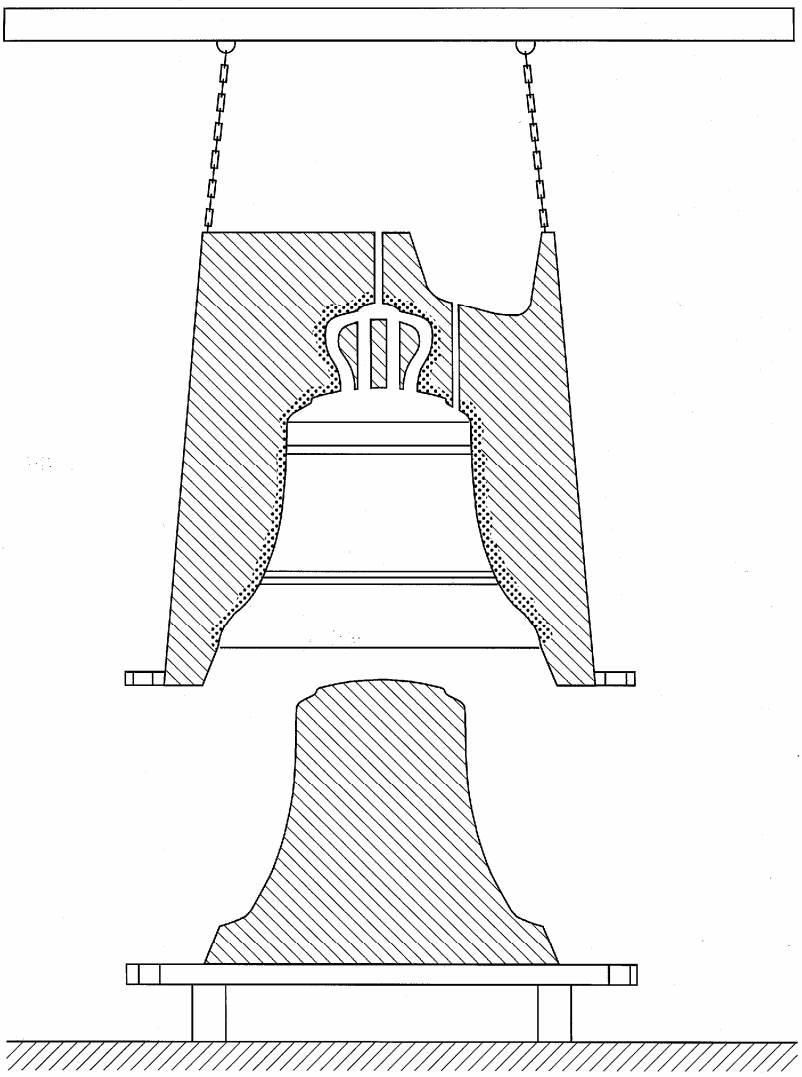
Wanneer kern en mantel zijn schoongemaakt, moet een zorgvuldig droogproces volgen. Hiervoor zijn twee redenen aan te voeren. De eerste is zeer evident. Wanneer namelijk het gloeiende brons met een temperatuur van meer dan duizend graden in aanraking komt met een vochtige vorm, zal binnen de kortste tijd zo'n grote hoeveelheid stoom ontwikkeld worden dat de vorm als het ware explodeert. Al het brons wat erin gegoten wordt, zal met enorme kracht eruit gestoten worden. Het staat bekend onder de naam *opstoten*. Het is een verschijnsel dat bepaald niet zonder gevaar voor de gieters is. Bovendien kan onder die omstandigheden van een gaaf gegoten klok geen sprake zijn.

De tweede reden is minder voor de hand liggend. Stel dat de vochtigheid van de vorm zeer gering is. Explosieve reacties zullen dan uitblijven. Niettemin wordt er stoom gevormd. En daar de waterdamp slechts ten dele een uitweg naar buiten kan vinden, zal het zich als poreusheid in het brons manifesteren. Een slecht gietsel is het gevolg.

Zoals in 3.3 en 3.5 werd uiteengezet, is de kern in tegenstelling met de mantel niet uit een vuurvast materiaal vervaardigd, althans wanneer cementzand is gebruikt. Om die reden wordt vóór het drogen de kern bestreken met een grafietlaag, een uitstekende bescherming

van het cementzand tegen het gloeiende brons. Ook zijn er synthetische *deklagen* in de handel, bijvoorbeeld op basis van aluminiumoxide. Hierna zal tot het drogen worden overgegaan.

Het drogen van de vormdelen kan natuurlijk op talloze manieren gebeuren. Men kan rondom de kern een vuur aanleggen of, wanneer de vorm groot is en derhalve hol werd gemaakt, in de kern briketten of turf verbranden. Het droogstoken van de mantel is iets eenvoudiger. Men kan namelijk volstaan met hem boven een vuur te hangen. Maar ook kan men van het begin van de opbouw van de vorm een zacht vuurtje in de kern gaande houden. Die werkwijze werd vooral bij lemen vormen toegepast. Overigens zijn er moderne vormmaterialen waarbij het drogen niet meer nodig is.



Figuur 10: De kern met daarboven de mantel.

De volgende stap is het bijwerken van de kern en in het bijzonder van de mantel. Kleine scheurtjes moeten dichtgemaakt worden, laatste ongerechtigheden verwijderd enz. Een verdere zorg is tenslotte het klepeloog. Hedendaagse klokken krijgen doorgaans een gat door de kop en de kroon. Dit middengat kan gebruikt worden om de klok op te hangen. Men steekt er namelijk een ijzeren ophangbout door, terwijl men bovendien aan die bout een oog kan bevestigen waaraan de klepel wordt gehangen (zie figuur 45 in 8.1). Oude klokken en sommige moderne hebben echter géén middengat. Om die reden moet het klepeloog in het plafond van de klok worden vastgegoten. De werkwijze daarbij is als volgt. Het vooraf uit ijzer gesmede klepeloog wordt voor het grootste deel in de kop van de kern aangebracht. Slechts de uiteinden blijven vrij. Tijdens het gieten zullen die door het brons ingesloten worden en daarmee verankerd in de kop van de klok.

Thans is het moment aangebroken waarop de mantel weer over de kern geplaatst kan worden. Het zal duidelijk zijn dat men daarbij zorgvuldig moet achten op een juiste centrering van de beide vormdelen. Zou men dit niet doen, dan zou men een scheve klok krijgen met alle rampzalige gevolgen van dien voor de klank. Dan ook wordt de betekenis van de sluitrand F (zie fig.4 en 3.3) ten volle duidelijk. Wanneer men namelijk de mantel langzaam over de kern laat zakken, zal deze dankzij de sluitrand vanzelf zijn juiste positie weten te vinden.

Nog steeds kan niet gegoten worden. De stalen mantel moet namelijk met enkele bouten aan de vormplaat bevestigd worden (fig.7). Want onmiddellijk nadat de vorm is volgegoten en het brons dus nog vloeibaar is, zal er een grote opwaartse druk ontstaan. Berekeningen tonen aan dat die kracht wel vijf maal zo groot is als het klokgewicht. Zou derhalve de mantel niet aan de vormplaat verankerd zijn, dan zou die mantel omhoog gedrukt worden met als gevolg dat al het brons onder uit de vorm zou weglopen.

Eindelijk is dan het moment van het gieten aangebroken. Het brons is inmiddels uit de oven in de gietpan gestort. Met behulp van een takel is die pan naar de klokkenvorm gebracht. Voor een klok met een gewicht van bijvoorbeeld enkele honderden kilo's is bet gieten betrekkelijk snel gebeurd, in niet meer dan vijf minuten. Tijdens het gieten zal dan ook intensieve zorg en aandacht nodig zijn, wil tenminste niet alle moeite tevergeefs zijn geweest. Een van de punten die bijzondere toewijding verdient, is het vermijden van slakinsluitingen in de klok. De eerste manier bestaat eruit dat met behulp van een grote ijzeren schuimspaan de slakken in de gietpan worden tegengehouden. En mochten er dan toch nog slakken in de gietkom (A in fig.7) terechtkomen, dan is het voldoende die gietkom met brons gevuld te houden. Slakken zijn namelijk lichter dan brons zodat ze blijven drijven. De slakken blijven derhalve bovenin de gevulde gietkom achter en zuiver brons kan aan de onderkant door het gietkanaal in de vorm stromen. Tijdens het gieten zullen natuurlijk ook gassen ontstaan. Deze kunnen echter door de opkomer of windpijpen naar buiten verdwijnen (C in fig.7).

Na het gieten zal de klok één tot meerdere dagen nodig hebben om af te koelen. Daarna kan ze uitgebroken worden. Discussie is overigens over de vraag of een klok snel of langzaam moet afkoelen. Ongetwijfeld heeft dit invloed op de kristalgrootte. Maar de vraag aan welke manier de voorkeur moet worden gegeven, kon tot op heden niet beantwoord worden.

3.8 De afwerking van de klok

Om de gedachten te bepalen, een klok van duizend kilo's kan desgewenst reeds na een dag uit de vorm gebroken worden. Hierbij gaan kern en mantel volledig verloren. Want niet alleen zullen ze tijdens het uithalen van de klok in stukken breken, doch bovendien hebben ze hun sterkte verloren na zolang aan extreme hitte te zijn blootgesteld. Zulks impliceert dan ook dat voor elke klok steeds opnieuw een gietvorm gemaakt moet worden. Trouwens, op grond van de steeds wisselende opschriften is dat ook noodzakelijk.

Nadat de klok uit de vorm is gehaald, is ze vanzelfsprekend nog met resten chamotte en zand bedekt. Men kan die op verschillende manieren verwijderen. De meest omslachtige is de klok met een staalborstel, zij het eventueel een elektrische, schoon te borstelen. Aanzienlijk sneller bereikt men zijn doel met behulp van *staalstralen*. Dit bestaat eruit zeer fijn staalgrit onder hoge druk tegen de klok te spuiten. Voorheen werd het ook wel met fijn zilverzand gedaan (*zandstralen*). In verband met een mogelijke silicose-aandoening is dat heden ten dage

echter verboden.

Nadat de klok is schoongemaakt, moeten giettap(pen) en opkomer(s) verwijderd worden. Ze worden eraf geslagen, gesneden of geslepen en de restanten op de klok worden vervolgens bijgewerkt met slijpschijf en/of vijl. Waar nodig worden verder kleine ongerechtigheden weggenomen, zoals bolletjes metaal in versiering of opschrift.

De laatste bewerking tenslotte verschilt van gieterij tot gieterij. Bij sommige wordt de klok glanzend opgeborsteld, bij andere daarentegen gepolijst. Vanzelfsprekend gaat het hierbij uitsluitend om een kwestie van smaak. In visueel opzicht is de klok hiermee voltooid. Ten aanzien van de klank en toon moet echter nog een zeer belangrijke bewerking volgen: het stemmen. Dit onderdeel zal in 3.8 aan de orde komen.

3.9 Gietfouten

Klokkengieten is een menselijk bedrijf. Het menselijk tekort, zoals onachtzaamheid, onzorgvuldigheid, gebrek aan kennis en wat al niet meer, zal zich ook in de gegoten klok kunnen manifesteren. Kunnen, omdat natuurlijk slechts een gering percentage van de gegoten klokken gietfouten zal bezitten, terwijl een nog geringer percentage naar de gietkroes moet terugkeren, om opnieuw gegoten te worden.

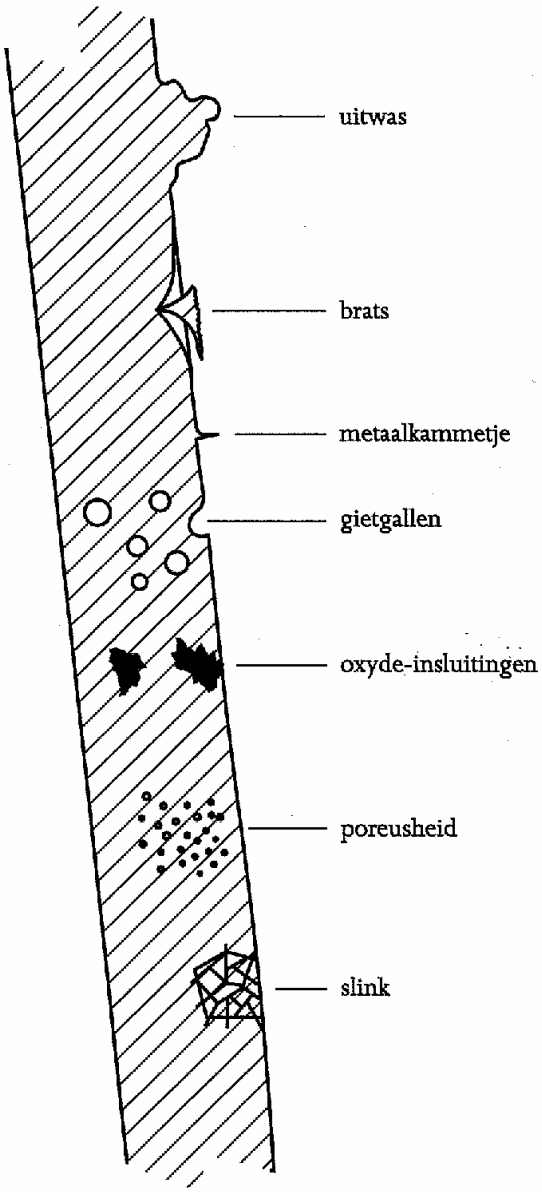
Doch welke zijn die mogelijke gietfouten (fig.11)? De meest onschuldige is een *uitwas* op het klokoppervlak. Plaatselijk is een verdikking, een bobbel, ontstaan omdat in de gietvorm aldaar een holte zat. De remedie is even eenvoudig als doeltreffend: wegslijpen en vijlen. Tenzij natuurlijk de uitwas zich in de versiering of het opschrift bevindt. Dan kan alleen zorgvuldig ciseleerwerk een oplossing bieden.

Heel wat hardnekkiger is de uitwas die uit een combinatie van brons en vormmateriaal bestaat. Wanneer in de buitenmantel bijvoorbeeld een poreuze plek zat, zal men na het gieten ter plaatse een uitwas zien die bestaat uit een mengsel van brons en chamotte. Een vijl is onmiddellijk bot op die materie, zó hard is zo'n uitwas. Slechts agressieve methodieken zullen hier tot een oplossing kunnen voeren.

Wij spraken over een relatief grote uitwas. Maar het is natuurlijk evenzeer mogelijk dat tijdens het instrijken van de valse klok met chamottepap luchtbelletjes zijn achtergebleven die later als kleine gaatjes aan het manteloppervlak terugkeren. De gegoten klok bezit daar ter plaatse kleine bobbeltjes. Gelukkig zijn deze met een beitel gemakkelijk te verwijderen. Is de mantel over zijn geheel poreus geweest, dan zal het uiterlijk van de klok korrelig en onscherp zijn. Meestal is de smeltoven dan de enige verstandige remedie

Een *brats* ontstaat wanneer tijdens het gieten de vorm plaatselijk scheurt en metaal achter die scheur loopt. Meestal is de brats gemakkelijk te verwijderen. Plaatselijk zal het oppervlak echter een inzinking houden. Met de brats verwant is het *metaalkammetje*. Het ontstaat wanneer tijdens het gieten wat metaal in een scheurtje van de vorm dringt. Het is een onschuldig verschijnsel.

Gietgallen zijn van geheel andere aard. Zitten uitwassen en bratsen óp de klok, een gietgal zit erin. De oorzaak kan zijn dat tijdens het gieten lucht werd opgesloten. Op de plaats waar dit geschiedde, zal de gegoten klok een bolle lege ruimte bezitten van gewoonlijk niet meer dan enkele millimeters doorsnede. Soms zijn die gallen met poeder gevuld. In dat geval is de oorzaak in de slak te zoeken die tijdens het gieten werd meegesleurd. Ditzelfde kan ove-



Figuur 11: Gietfouten.

rigens ook gebeuren met oxide-insluitingen welke zich van slak onderscheiden door hun onregelmatige structuur en donkere kleur. Het zal vanzelfsprekend duidelijk zijn dat deze oxiden tijdens het smelten ontstonden, toen de toevoer van olie en lucht in onjuiste verhouding plaatsvond (zie 3.6).
Wanneer gietgallen in grote getale voorkomen en de doorsnede van elk gaatje slechts gering is (minder dan 1 mm). spreekt men gewoonlijk van *(micro)poreusheid*. In het algemeen kan men de oorzaak niet vinden in meegevoerde lucht tijdens het gieten. Veeleer is het een kwestie van onjuist smelten waarbij verbrandingsgassen in het vloeibare brons worden opgenomen. Ook kan de oorzaak schuilen in een niet helemaal gedroogde vorm die tijdens het gieten gassen afgeeft, welke niet volledig door de ontluchtingskanalen afgevoerd kunnen worden.
Een andere gietfout tenslotte is *slink*. Het is een vorm van porositeit waarbij de kristalstructuur van het brons duidelijk te zien is. En dat in tegenstelling met gasporositeit waarbij de gaatjes bijna altijd een ronde doorsnede hebben. Slink ontstaat wanneer in een bepaald deel van het kloklichaam tijdens het stollen onvoldoende vloeibaar materiaal aanwezig is. Immers, brons krimpt tijdens het afkoelen. Wordt nu onvoldoende vloeibaar brons van hoger in de nog vloeibare klok aangevoerd, dan zal slechts het geraamte van de kristallen, de zogenaamde dendrieten gevormd worden en de tussenliggende delen leeg blijven. Het vermijden van slink is een vrij ingewikkeld probleem. Om die reden zij hiervoor verwezen, evenals voor de bestrijding van andere gietfouten, naar leerboeken over gieterijtechniek.

In de voorafgaande opsomming zijn de meest voorkomende en vooral in het oog lopende gietfouten genoemd. Maar, het zij voor de volledigheid opgemerkt, soms blijven ze onzichtbaar en treden pas aan het licht wanneer de klok stukgeslagen wordt. Daardoor ook kan de paradoxale situatie ontstaan dat klokken met onmiskenbare gietfouten niettemin een goede klank bezitten en schijnbaar gaaf gegoten klokken juist niet. Wij komen daar later (4.13) op terug. Nu reeds zij vastgesteld dat een gietfout niet alleen het visuele aspect van de klok kan schaden, maar evenzeer de zuivere toon en de mooie klank.

4 KLANK EN TOON VAN DE INDIVIDUELE KLOK

4.1 De grondtoon en zijn boventonen

Wanneer men een klok aanslaat en men luistert zorgvuldig naar haar klank, zal men al snel ontdekken dat de klokkenklank uit meer dan één toon is opgebouwd. Het is allerminst een specifieke eigenschap van de klok; andere muziekinstrumenten laten hetzelfde verschijnsel beluisteren. De tonen die in de muziek gebruikt worden, zijn in wezen dan ook klanken met een bepaalde toonhoogte.

Voor een juist begrip van de klokkenklank zal het goed zijn allereerst een uitstapje te maken naar andere instrumenten. en met name naar die waarvan de toon wordt voortgebracht door een trillende luchtkolom (orgelpijp) of een volkomen flexibele snaar. De structuur van die tonen immers hebben de muziekcultuur van Europa in hoge mate bepaald.

Indien men de klank van een orgelpijp of een snaar zorgvuldig analyseert, blijken er, wanneer men de laagste toon (*grondtoon*) naar c^1 transponeert, de volgende tonen aanwezig te zijn:

c^1 c^2 g^2 c^3 e^3 g^3 bes^3- c^4 d^4 enz.

Hierin betekent het minteken een lichte verlaging ten opzichte van de daarnaast geschreven toonhoogte. Indien een kleine verhoging genoteerd moet worden, zal het plusteken gebruikt worden. Het merkwaardige aan deze reeks is het feit dat de eerste zes tonen (de grondtoon en de eerste vijf *boventonen*, of de eerste zes *partiaaltonen* of *partialen*) een volkomen harmonische reeks vormen, of anders gezegd, de grote drieklank in een gespreide ligging. Rekenkundig is die eigenschap nog duidelijker te illustreren.

Allereerst introduceren wij daarvoor de grootheid *frequentie* die in Hz (Hertz) wordt uitgedrukt. De benen van een aangeslagen a^1-stemvork gaan met een snelheid van 440 maal per seconde heen en weer. Men zegt dan dat deze a^1 een frequentie heeft van 440 Hz. Geven wij vervolgens de frequenties van bovenstaande reeks, de zogenoemde *eigenfrequenties* van pijp of snaar, dan luiden die als volgt:

261,63 - 523,25 - 784,90 - 1046,5 - 1306,4 - 1569,8 - 1831,6 - 2093,0 - 2354,8 Hz .

Indien wij de verhoudingen tussen deze trillingsgetallen berekenen, komt de volgende intrigerende reeks aan het licht:

1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8 : 9 enz.

Er is kennelijk een relatie tussen fundamentele akkoorden (grote drieklank) en eenvoudige getallen. Deze boventonen worden dan ook *harmonischen* genoemd. Genoemd verband heeft de muziekpsychologie reeds lang onderkend. En wat meer is, ze zegt bovendien dat bij een dergelijke reeks de luisteraar de (boven)tonen niet afzonderlijk hoort, doch een totaalklank met de toonhoogte van de grondtoon. De grondtoon c^1 geeft derhalve de toonhoogte aan van de in ons voorbeeld gekozen pijp- of snaartoon. Bij dit alles spreken wij niet over de sterkte van elk der partialen. Deze bepaalt de *klankkleur* of het *timbre* van de toon.

Dit vertrouwde klankbeeld dat bij vele West-Europese muziekinstrumenten wordt teruggevonden, blijkt niet voor de klok te gelden. Of correcter geformuleerd, slaginstrumenten (trommel, pauk, xylofoon enz.) hebben geen harmonisch klankbeeld, zodat de boventonen géén harmonischen zijn. Een goede klok met grondtoon c^1 blijkt bijvoorbeeld de volgende

boventonen te bezitten waarbij opgemerkt moet worden dat in werkelijkheid klokken onderling allerlei afwijkingen kunnen bezitten. Het hier geschetste beeld is dus een ideaalbeeld.

c^1 c^2 es^2 g^2 c^3 e^3 f^3- f^3+ g^3 enz.

Slechts bij de laagste vijf partiaaltonen blijkt een harmonische reeks aantoonbaar, zij het van een meer gecompliceerde structuur dan bij een snaar. Zulks is ook begrijpelijk daar die tonen in plaats van de grote. de kleine drieklank vormen. De verhoudingsfrequenties zijn als volgt:

5 : 10 : 12 : 15 : 20 of 1/12 : 1/6 : 1/5 : 1/4 : 1/3

Maar er is nog meer waarin de klok zich van een snaar, een orgelpijp enz. onderscheidt. Mag men van een orgelpijp of een goede snaar verwachten dat deze altijd de harmonische tonenreeks bezitten, bij een klok is de reeks partialen sterk afhankelijk van het gebezigde profiel. Zo kan het bijvoorbeeld gebeuren dat de eerste boventoon, dus de tweede partiaal niet een c^2 is doch een b^1 of juist een cis^2. Het geschetste akkoord is dan ook een ideaalbeeld. Daarin domineren octaven. Vandaar dat men dan ook spreekt van de *octaafklok* in tegenstelling met noon-, septiem- en zelfs sextklokken. Wij komen daar in 4.15 nog op terug.

Ook komt de toonhoogte van een klok op een andere wijze tot stand dan bij snaar of orgelpijp. Bij laatstgenoemde instrumenten wordt de toonhoogte van de totaalklank door de grondtoon bepaald; bij een klok daarentegen door de zogenoemde *slagtoon* die zijn oorsprong vindt in de vijfde partiaal, de vierde boventoon dus.

In tegenstelling met de boventonen is de slagtoon een psycho-akoestisch verschijnsel. Zijn aanwezigheid in de klank is dan ook niet met natuurkundige middelen aan te tonen. De slagtoon wordt namelijk in ons gehoororgaan gevormd en dus niet in de klok. In 4.6 zullen wij daar uitvoeriger op ingaan. Hier moge vastgesteld worden dat de slagtoon een toonhoogte heeft die één octaaf lager is dan die van de vierde boventoon, dus de vijfde partiaal. In ons voorbeeld is dat derhalve c^2. Daar in dat voorbeeld deze toonhoogte samenvalt met die van de eerste boventoon is men natuurlijk geneigd beide als één toon te beschouwen. Dat is echter onjuist. Evenals de grondtoon en de andere boventonen vindt de eerste boventoon zijn ontstaan in het trillen van de klokkenwand. De slagtoon daarentegen ontstaat in ons gehoor.

Het fenomeen slagtoon kan wellicht aan het volgende voorbeeld nader geïllustreerd worden. In het voorafgaande spraken wij namelijk steeds van een goede octaafklok. Vele klokken, in het bijzonder oude luidklokken, hebben echter afwijkende toonstructuren. De grote Salvator van Mechelen bijvoorbeeld laat voor de grondtoon en de eerste vier boventonen ten naaste bij het volgende beeld zien:

Fis g a+ c^1+ fis^1

Ook bij deze klok is de slagtoon, de toon die de toonhoogte van de klok bepaalt, één octaaf lager dan de vierde boventoon fis^1. De Salvator klinkt derhalve met toon fis. De eerste boventoon ligt bij deze klok echter een halve toon hoger. Het behoeft vanzelfsprekend geen betoog dat de luisteraar hierdoor in verwarring kan raken. Hij hoort de klok namelijk op een fis, doch gelijktijdig is een storende g waarneembaar. Aldus wordt het ook duidelijk waarom een goede klok tenminste de volgende getransponeerde reeks toon bezit:

c^1 c^2 es^2 g^2 c^3

Natuurlijk rijst de vraag waarom de klok niet een boventoonstructuur kan bezitten die identiek is aan die van de snaar en derhalve de hoogste versmelting bezit. Het antwoord is eenvoudig: het blijkt niet mogelijk een zodanig klokprofiel te ontwerpen waarmee die wens vervuld kan worden. De kleine drieklank is het optimum wat bereikbaar is, zij het dat sinds 1985 een zo-

genoemde grote terts-klok beschikbaar is. In die klok is de derde partiaal van een kleine in een grote terts gewijzigd. Niet iedereen vindt het een geslaagde modificatie van de traditionele klok. Maar wij komen hier in 4.16 op terug.

Ook moeten de gieter en de musicus aanvaarden dat boven de vierde boventoon de partialen nog meer van het harmonische ideaal afwijken en bovendien in lang niet alle klokken hetzelfde. Wel is daar de gelukkige omstandigheid dat juist sommige dissonerende boventonen slechts zwak gehoord worden en dan alleen nog tijdens de aanslag. In 4.4 zal dit aspect uitvoerig behandeld worden.

In het voorafgaande werd steeds gesproken. over grondtoon, eerste boventoon, tweede boventoon enz. Uiteraard is dat in de praktijk nogal lastig en weinig zeggend. Om die reden heeft men de boventonen muzikale eigennamen gegeven ook al wijkt de letterlijke inhoud bij onzuivere klokken daarvan af. Bedoelde namen gelden dan ook strikt genomen alleen voor de ideale klok. Men merke op dat de eerste boventoon priem heet omdat deze samenvalt met de slagtoon.

c^1	grondtoon
c^2	priem
es^2	kleine terts
g^2	kwint
c^3	octaaf
e^3	grote deciem
f^3-	eerste undeciem
f^3+	tweede undeciem
g^3	duodeciem
a^3	onbenoemd
b^3	onbenoemd
c^4+	dubbeloctaaf

Ook in dit voorbeeld werd ten aanzien van afwijkingen volstaan met tekens voor iets hoger en iets lager zonder daarbij te mogen suggereren dat tonen als a^3 en b^3 volstrekt zuiver zouden zijn. In de praktijk is daarom een fijnere verdeling nodig. Om die reden wordt het microinterval *cent* gebruikt. Per definitie is het interval cent het 1/1200 van een octaafinterval of 1/100 van een. hedendaagse halve toon. Aldus ook kunnen zéér kleine afwijkingen ten opzichte van de normaaltoon genoteerd worden. De Salvator van Mechelen bijvoorbeeld geeft dan volgende beeld:

grondtoon	Fis-10 cents
priem	fis+102 cents
kleine terts	a+17 cents
kwint	cis^1-56 cents
octaaf	fis^1-17 cents

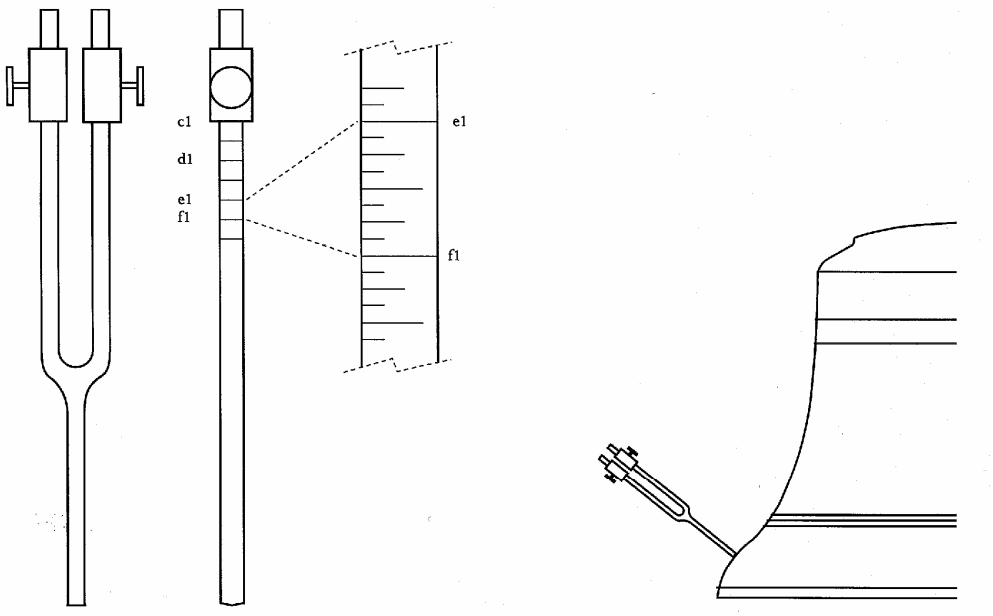
Uit dit voorbeeld blijkt duidelijk dat de partiaalnamen aan de ideale octaafklok ontleend werden. De kwint-boventoon bijvoorbeeld is bij deze klok in werkelijkheid een kwart-interval boven de priem en een ruime tritonus boven de slagtoon (fis-17 cents).

Na deze voorlopige oriëntering in de klokkenklank zal het goed zijn allereerst na te gaan hoe dergelijke kleine afwijkingen als een cent gemeten worden.

4.2 Meetinstrumenten

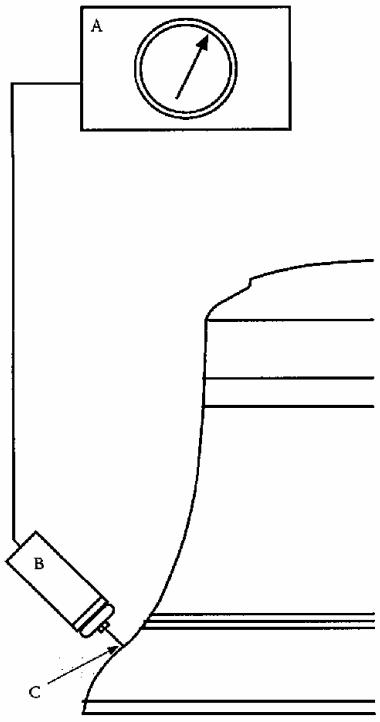
Een enigszins getrainde luisteraar zal in een rustige omgeving maximaal zeven tonen in de klokkenklank kunnen opmerken. Het zijn grondtoon, priem, kleine terts, kwint, octaaf, grote deciem en duodeciem. Uiteraard kan hij zich op die wijze een beeld vormen van de inwendige zuiverheid van de klok, de mate derhalve waarin de boventonen aan het ideaalbeeld beantwoorden. Maar bij kleine afwijkingen moet hij het laten afweten. Alleen een meetinstrument zal dan nog hulp kunnen bieden. Met deze uitspraak dreigt overigens een misverstand te ontstaan. Een violist bijvoorbeeld kan op uitstekende wijze zijn viool enkel en alleen op het gehoor afstemmen. Blijkbaar heeft hij géén meetinstrument nodig. De oorzaak wordt onmiddellijk duidelijk wanneer wij bedenken dat de boventonen van een snaar een vaste harmonische reeks vormen. Nemen wij bijvoorbeeld de g- en d^1-snaar. Hun harmonischen luiden als volgt:

g-snaar	g		g^1	d^2	g^2		enz.
d^1-snaar		d^1		d^2		a^2	enz.



Figuur 12: De verstelbare stemvork.

Indien beide snaren geen zuivere kwint vormen, zullen de twee d^2-tonen niet geheel samenvallen. Het gevolg is dat bij samenklinken zwevingen gehoord worden. Het is derhalve voldoende om net zo lang aan de stemschroeven te draaien totdat géén zwevingen meer te horen zijn. Alleen dan zullen de beide d^2-tonen samenvallen en de twee snaren dus een zuivere kwint vormen. Stilzwijgend wordt daarbij natuurlijk aangenomen dat de inwendige stemming van een snaar steeds een harmonische structuur bezit. Dat is onder normale omstandigheden inderdaad het geval, Deze essentiële voorwaarde voor het stemmen met behulp ven zwevingen wordt bij de klok echter niet vervuld. De inwendige stemming van een klok is allerminst een vaste grootheid. In 4.7 en 4.8 komen wij daar nog op terug.

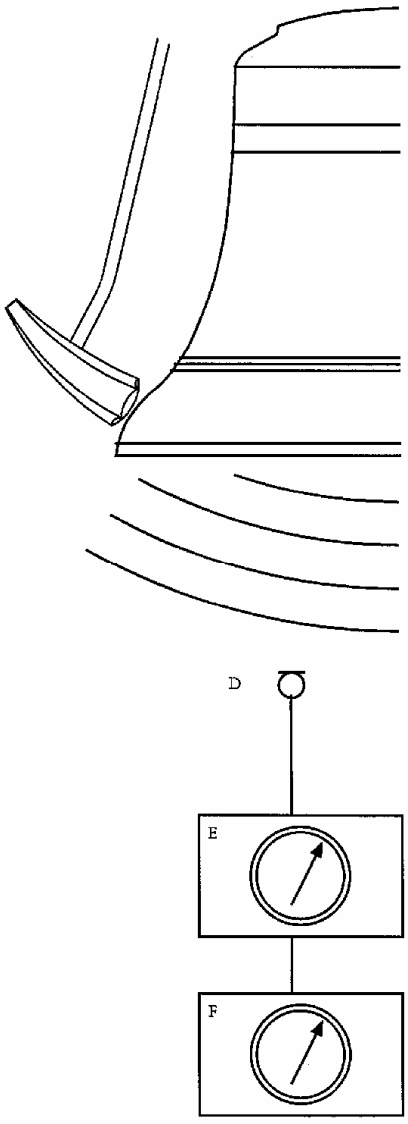


Figuur 13: Meetinstrument met excitator.

De juiste toonhoogte van de klokpartialen moet derhalve gemeten worden. Het meest eenvoudige hulpmiddel is een reeks *verstelbare stemvorken* (fig.12) die tezamen het gehele hoorbare gebied bestrijken. Op de benen van zo'n stemvork zijn twee verschuifbare zogenaamde *loopgewichten* geklemd. Worden ze op de uiteinden geplaatst, dan zal de stemvork haar laagste toon geven. Worden ze geleidelijk naar het midden geschoven dan zal de toon gaan stijgen. In principe kan derhalve binnen het bereik van de desbetreffende stemvork elke toonhoogte worden ingesteld. De ijking op één der benen zorgt ervoor dat men de ingestelde toon kan aflezen. Zo staat de stemvork van figuur 12 op c^1 afgesteld. Bij tonen die niet precies met een normaaltoon samenvallen, is vanzelfsprekend een verdeling van de halve toon noodzakelijk. Rechts is dit vergroot weergegeven tussen e^1 en f^1. Allereerst in de helft van een halve toon, vervolgens in kwarten en als laatste in achtsten. Schattenderwijs tenslotte kan men nog één zestiende van een halve toon (=6¼ cent) aflezen. Hiermee is ook de nauwkeurigheid van een stemvorkmeting min of meer bepaald. Het verklaart bovendien waarom in sommige klokkengieterijen niet met cents wordt gewerkt, doch met zestienden. Ook nu nog is dat de gebruikelijke verdeling van stemvorken, zelfs voor nieuwe.

Wanneer men op het gehoor de stemvork heeft ingesteld, kan men dit controleren door de voet van de stemvork tegen de klok te houden en vervolgens de stemvork aan te slaan (fig.12). Komt dan de frequentie van de ingestelde toon inderdaad overeen met één van de eigenfrequenties van de klok, dan zal de klok in die bepaalde toon gaan meeklinken (resoneren). Het is een analoog verschijnsel met de proef waarin men op de toonhoogte van een wijnglas fluit waardoor het glas in resonantie raakt.

Een andere manier om met stemvorken te meten bestaat eruit een grote reeks *vaste stemvorken* te gebruiken die bijvoorbeeld met 4 Hz oplopen. Elke partiaal wordt dan met twee opeenvolgende stemvorken vergeleken. Het aantal zwevingen met de lagere en de hogere



Figuur 14: Elektrische toonfilter.

stemvork bepaalt dan waar de desbetreffende klokpartiaal zich tussen beide in bevindt.

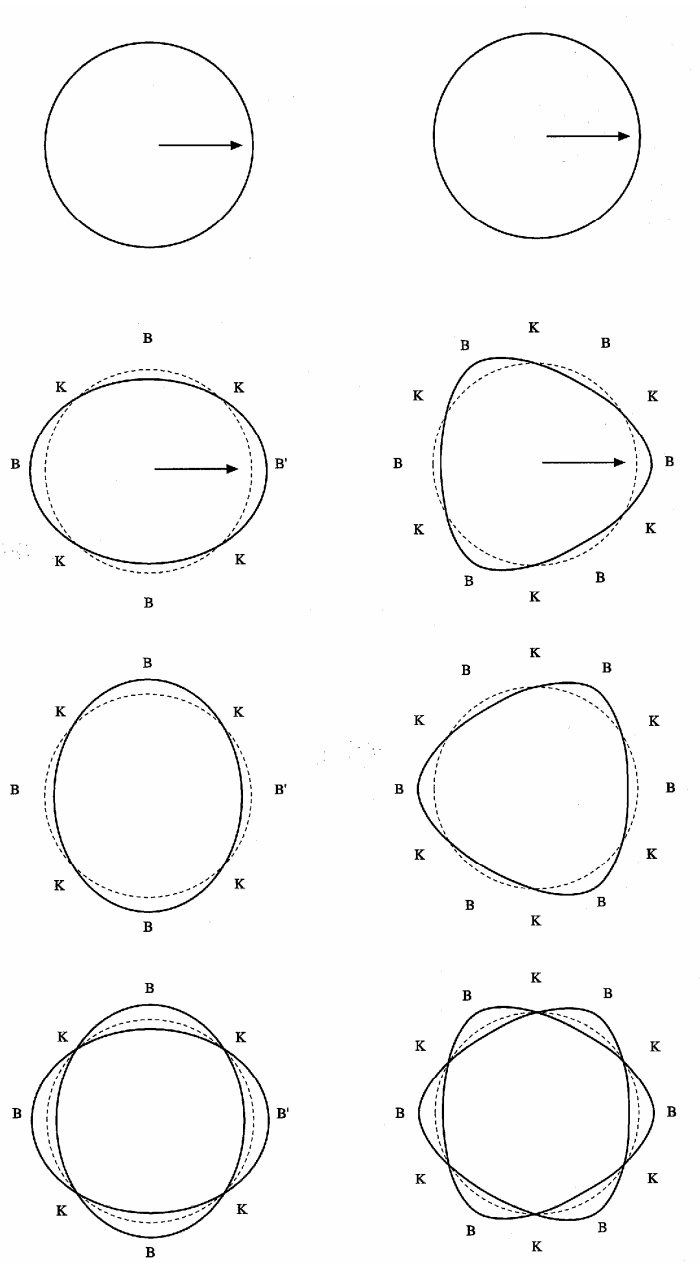
Vanzelfsprekend bestaan er reeds lang elektronische varianten op de stemvork. Het principe is in figuur 13 geschetst. A is een toongenerator, een instrument dat langs elektrische weg alle tonen kan geven. Deze tonen worden als elektrische trillingen naar de excitator B geleid. In dit handzame instrumentje worden die elektrische trillingen omgevormd in mechanische trillingen en vervolgens toegevoerd naar pen C. Deze pen trilt derhalve in de frequentie zoals die in de toongenerator werd ingesteld. De pen is dus vergelijkbaar met de voet van de stemvork. Drukt men vervolgens de pen tegen de klok en komt de ingestelde frequentie van de toongenerator overeen met één der eigenfrequenties van de klok, dan zal die klok in die bepaalde frequentie, dus met de daarmee overeenkomende toon gaan resoneren. Aflezing tot op één cent nauwkeurig geschiedt op de geijkte toongenerator.

Een omgekeerd systeem van meten vinden we in figuur 14. Daar wordt de klok op normale wijze aangeslagen en het geluid door een microfoon D opgevangen. Vervolgens wordt het naar een elektrisch filter E gevoerd. In dit apparaat kan men van een toegevoerde klank alle partialen op één na doorlaten. Die ene toon wordt vervolgens naar meetinstrument F geleid. Daar wordt hij gemeten.

En tenslotte is daar de veel gebruikte *strobofrequentiemeter* of *strobometer*. De werking berust op het stroboscopisch effect. Men ziet dat soms in een film. Wanneer bijvoorbeeld de wielen van een rijtuig op het filmdoek stilstaan, is in werkelijkheid het aantal filmbeelden per seconde gelijk aan de frequentie waarmee de spaken van dat wiel dezelfde positie innemen. Dus tekens als het wiel op de film werd vastgelegd, stond dat wiel in dezelfde positie als de voorafgaande keer toen dat beeld werd vastgelegd. Kent men vervolgens de snelheid van de filmbeeldjes, dan weet men ook de snelheid waarmee het wiel ronddraait. Met dit effect kunnen ook tonen gemeten worden. Het door een microfoon opgevangen geluid laat neonlampen in dezelfde frequentie aan en uitgaan. Dat licht laat men op snel ronddraaiende schijfjes vallen. Door de snelheid van die schijfjes gecontroleerd aan te passen totdat een band daarop schijnt stil te staan, kan men de frequentie van de toon aflezen.

Ten aanzien van de nauwkeurigheid van elektronische meetinstrumenten mag men in het algemeen stellen dat deze groter is dan die van stemvorken. Ze ligt in de orde van grootte van enkele cents. Zulks impliceert overigens allerminst dat het gehoor hiermee uitgeschakeld kan worden. Meten blijft onder alle omstandigheden een hulpmiddel. Het muzikale gehoor zal steeds de beslissing moeten nemen, zelfs al zou die in strijd zijn met de elektronisch uitgevoerde metingen!

4.3 Classificatie van boventonen



Figuur 15: Horizontale trillingsvormen.

Loopt men rondom een klinkende niet te kleine klok en richt men zijn aandacht uitsluitend op de grondtoon dan zal men gemakkelijk opmerken dat deze toon vier maal sterk en vier maal zwak wordt. Blijkbaar is de uitstraling van de grondtoon voor alle punten van de klok niet dezelfde. Hoewel met meer moeite blijkt een dergelijk verschijnsel ook bij de kleine terts waarneembaar. Bij die partiaal is het sleutelgetal niet vier doch zes, want rondom de klok wandelend hoort men de terts zes maal sterk worden en zes maal zwak.

Vanzelfsprekend moet de oorzaak in een bijzondere manier van trillen van de klokkenwand gezocht worden. In figuur 15 is dat in een overdreven schaal aanschouwelijk voorgesteld. In het linker deel ziet men bovenaan een cirkelvormige doorsnede van de klok. Wordt deze in de pijlrichting van binnenuit aangeslagen en beperken wij ons tot de bewegingen die de grondtoon vormen, dan zal de wand ter plaatse een weinig naar rechts uitwijken. Eenmaal de maximale uitwijking bereikt, zal ze als gevolg van de elastici-

teit van het brons teruggaan en via haar rustpositie naar links uitwijken. Vervolgens gaat de wand weer naar rechts enz. De maximale uitwijking wordt door de demping allengs minder en is nul wanneer de klok is uitgeklonken. Aldus ontstaat voor dit punt een heen en weer gaande beweging, op dezelfde wijze als voor elk punt van een snaar bijvoorbeeld of een slinger. Deze heen en weer gaande beweging gaat, althans wanneer wij ons tot de grondtoon beperken, in de frequentie van die grondtoon. Bij een klok met grondtoon c^1 is dat 261,63 Hz, dus bijna 262 maal per seconde. Een heen en weer gaande beweging duurt derhalve 1/262 seconde, dus bijna 0,004 seconde. Dit noemt men de *trillingstijd* of de *trillingsperiode*.

Het spreekt vanzelf dat deze heen en weer gaande beweging zich niet beperkt tot één punt van de klok. In de tweede schets in het linker deel van figuur 15 is dat wederom voor de grondtoon aanschouwelijk voorgesteld. Hierin is de puntlijn de klok in rusttoestand. Indien punt B' waar de klepel tegen aansloeg, naar buiten uitwijkt, zal de doorsnede van de klok zich vervormen tot een ellips. Dat wil zeggen, het tegenoverliggende punt B gaat eveneens naar buiten, terwijl de daartussen liggende punten B naar binnen wijken. De consequentie daarvan is dat er in de omtrek vier punten K zijn aan te wijzen die in rust blijven.

Wanneer B' door de elasticiteit van het klokkenbrons niet alleen terugkeert naar zijn rustpositie (gepunte cirkel), doch vervolgens naar binnen uitwijkt, zullen de overige punten B zich daar wederom aan aanpassen. In de derde schets is die situatie weergegeven. In de laatste tenslotte zijn de beide maximale posities tezamen in één tekening weergegeven. Duidelijk kan men zien op welke wijze elk punt van de klokkenwand om de evenwichtstoestand van die wand heen en weer slingert, terwijl de vier punten K in rust blijven.

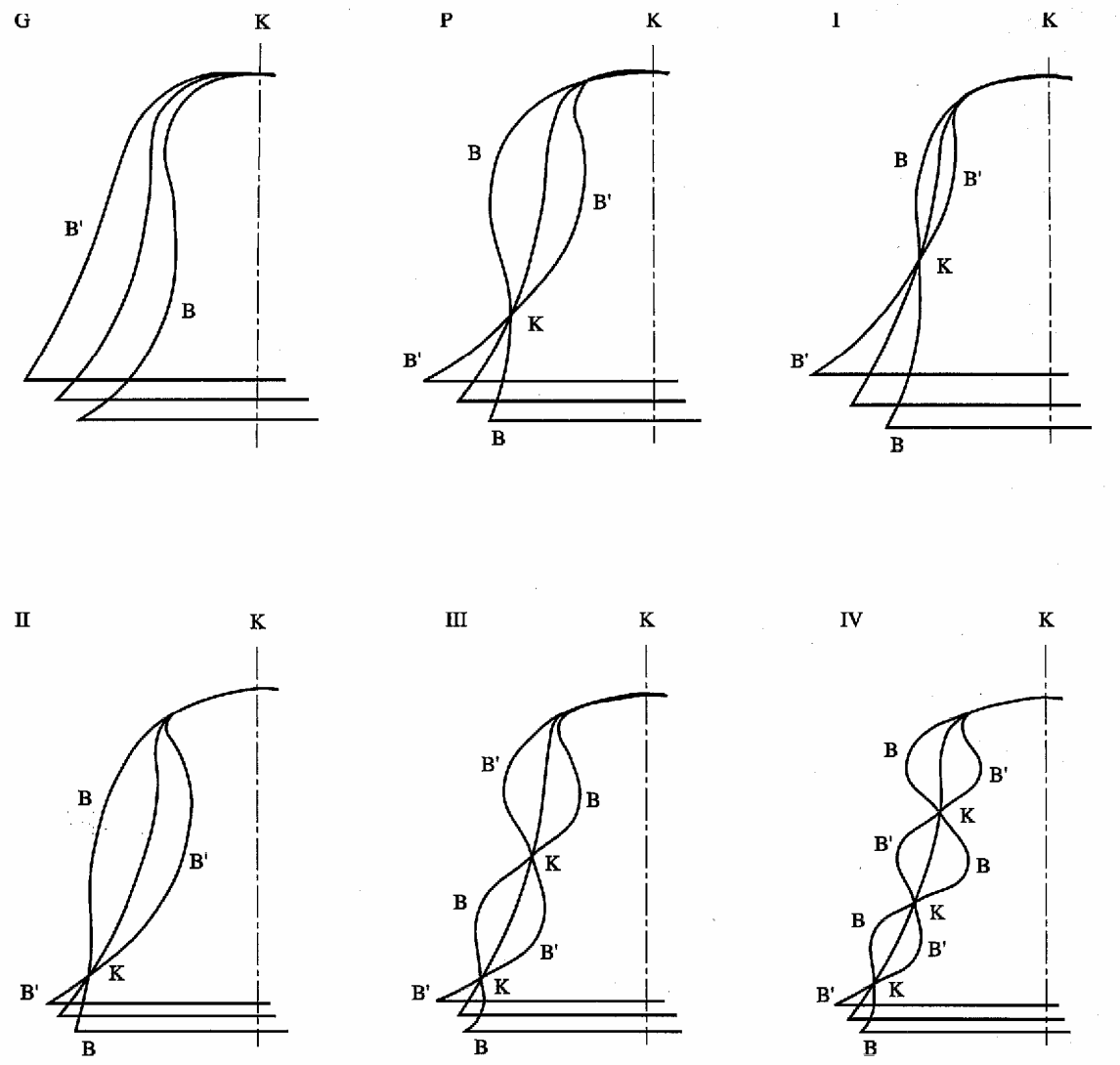
Plaatsen waar de klokkenwand voor een bepaalde partiaal maximaal trilt, worden *buiken* (B) genoemd. Plaatsen waar de klokkenwand voor een bepaalde partiaal in rust blijft heten *knopen* (K). Daartussen is een geleidelijke overgang van géén naar maximale beweging. Men dient overigens te beseffen dat het hier besprokene voor elke horizontale doorsnede geldt. De knopen zijn dan ook geen punten, doch verticale lijnen op het klokoppervlak, dat wil zeggen *knoopmeridianen*.

Thans zal het duidelijk zijn dat de lucht bij de buiken het heftigst in beroering wordt gebracht. Daar zal het geluid van de grondtoon derhalve het sterkst zijn. Vooral bij grote klokken is dat goed hoorbaar. Bij de knopen daarentegen wordt de lucht niet beroerd, waardoor de luisteraar in die richting horend slechts naburig geluid kan opvangen.

Het merkwaardige feit doet zich voor dat slechts een deel van de boventonen, evenals de grondtoon en priem, in vieren trillen. Een even groot aantal trilt in zessen, in achten, in tienen enz. De kleine terts-partiaal bijvoorbeeld heeft zes buiken en zes knopen in de omtrek van de klok. Tot welke vervormingen dit aanleiding geeft, is in het rechter deel van figuur 15 getekend.

In het voorafgaande spraken wij alleen maar over de grondtoon en de kleine terts. Bij deze partialen is de sterkteverdeling in de omtrek tamelijk gemakkelijk op het gehoor vast te stellen. Bij de overige boventonen moeten echter andere hulpmiddelen gebruikt worden. Een geschikte opstelling is bijvoorbeeld de volgende. Met één van de meetinstrumenten welke in 4.2 beschreven zijn, wordt de klok voor de te onderzoeken boventoon in permanente trilling gebracht. Vervolgens tast men met een stethoscoop het klokoppervlak in de omtrek af. Gemakkelijk kan men dan de punten van maximale en minimale sterkte vinden. Het is een methode die ook voor onderzoek in verticale richting uiterst nuttig is. En dit temeer omdat in te-

genstelling met de omtrek de plaats van de buiken en knópen in verticale richting lang niet zo voor de hand ligt. In figuur 16 is dit voor een aantal partialen met behulp van de halve geschematiseerde doorsnede van de klok in tekening gebracht. Hierbij moet overigens de opmerking worden gemaakt, dat de uitwijkingen van de klokkenwand op zéér overdreven schaal zijn voorgesteld. In werkelijkheid is dat voor een klok van duizend kilo's niet meer dan één millimeter.



Figuur 16: Verticale trillingsfiguren.

Tekening G geeft voor de grondtoon de halve verticale trillingsfiguur in een buikmeridiaan. Bij een even aantal knoopmeridianen is de rechter helft het spiegelbeeld daarvan. De grondtoon doet derhalve hetzelfde als een stemvork. De hele wand wijkt uit naar buiten totdat een maximale positie is bereikt (B'). Vervolgens keert ze terug, gaat als gevolg van de elasticiteit door de evenwichtstoestand en bereikt een maximale uitslag naar binnen (B). Ook hier is weer een buik aan te wijzen, een plaats dus waar de wand dit maal in verticale richting bezien het heftigst trilt. Een knoop tenslotte bevindt zich in de kop van de klok.

no.	naam	toon	fysische notatie					
1	grondtoon	c+0	I-2					
2	priem	c^{1}-2		II-2				
3	kleine terts	es^{1}-1	I-3					
4	kwint	g^{1}+3		II-3				
5	octaaf	c^{2}-2	I-4					
6	grote deciem	e^{2}-44		II-4				
7	2^{de} undeciem	f^{2}-18			III-3			
8	1^{ste} undeciem	f^{2}+24			III-2			
9	duodeciem	g^{2}+6	I-5					
10		a^{2}-41			III-4			
11		ais^{2}-17		II-5				
12	dubbeloctaaf	c^{3}+94	I-6					
13		cis^{3}+13				IV-2		
14		cis^{3}+40				IV-3		
15		cis^{3}+45					V-2	
16		d^{3}-43			III-5			
17		dis^{3}+6				IV-3		
18		dis^{3}+19		II-6				
19		e^{3}-12						VI-2
20	dubbelundeciem	f^{3}+31	I-7					
21		fis^{3}-3				IV-5		
22		fis^{3}+9			III-6			
23		g^{3}+30						VI-3
24		g^{3}+36					V-3	
25		gis^{3}-14		II-7				
26		gis^{3}+47					V-4	
27		a^{3}+19	I-8					
28		a^{3}+32				IV-6		
29		ais^{3}+11			III-7			
30		ais^{3}+47					V-5	
31		b^{3}+4						VI-4
32		c^{4}-4		II-8				
33	tripeloctaaf	c^{4}+48	I-9					
34		cis^{4}-36				IV-7		
35		cis^{4}-11					V-6	
36		d^{4}-28			III-8			
37		d^{4}+27						VI-5
38		dis^{4}+33	I-10					
39		e^{4}-44		II-9				

Tabel 1: Klankanalyse van een c^{1}-klok, diam. 1556 mm, gewicht m. kr. 2310 kg.

Wil men tenslotte een volledig beeld krijgen van de wijze waarop de klok voor de grondtoon trilt, dan dient men de desbetreffende schets uit figuur 15 voor elke horizontale doorsnede te combineren met G. Deze combinatie is alleen nog maar in een ruimtelijke figuur voor te stellen. Daar dit uiterst moeilijk is, kan slechts geadviseerd worden zulks in gedachten te doen!

Is voor de grondtoon een ruimtelijke figuur al moeilijk te tekenen, voor de priem en hogere boventonen is dat nog gecompliceerder. De verticale halve trillingsfiguur van de priem is in figuur 16 als P getekend. Men ziet daarin dat wanneer de slagring door de klepel naar buiten gedreven wordt, de flank naar binnen gaat (B'). Daartussen ligt de knoop K. Voorts is er nog een knoop in de kop van de klok. Nadat vervolgens de halve trillingsperiode verstreken is, is de situatie juist omgekeerd. De slagring is naar binnen gericht, de flank naar buiten. Hierbij dient men zich te realiseren. dat dit proces, zij het met andere amplitudo's, zich in elke willekeurige verticale doorsnede van de klok afspeelt. Knoop K is daarom geen punt op de klok, doch een lijn, evenwijdig aan de basis van de klok. Vandaar dat ook wel gesproken wordt over een *knoopparallel.*

Trillingsfiguur I geldt zowel voor de kleine terts, octaaf, duodeciem, dubbeloctaaf en vele hogere. Ook hier twee buiken en één knoopparallel alsmede de knoop in de kop van de klok. Ten opzichte ván P is de plaats van de knoopparallel iets anders. Ditzelfde geldt voor trillingsfiguur II die voor de kwint, grote deciem en talloze hogere partialen geldt. Bij III wordt de figuur weer iets gecompliceerder. Hier zijn twee knoopparallellen met alle consequenties van dien voor de buiken. Men realisere zich bijvoorbeeld dat wanneer de slagring naar buiten uitwijkt, de klok een vorm aanneemt die overeenkomt met de lijn: B' - K – B' - K – B' - K en zo verder naar de andere hier niet geschetste helft van de klok. Figuur III is van kracht voor de eerste en tweede undeciem en voorts voor wederom hogere partialen. En zo kan men doorgaan met telkenmale één buik en één knoop extra. Trillingsfiguur IV is daarvan het laatste voorbeeld. De boventonen die hieraan beantwoorden liggen reeds boven het dubbeloctaaf.

Op basis van de voorafgaande beschouwingen is in tabel 1 een overzicht gegeven van de boventonen in een willekeurige c^1-klok met een doorsnede van 1556 mm en een gewicht van 2310 kg met kroon. Volledigheidshalve moet echter opgemerkt worden dat tussen de daar genoteerde circa veertig tonen nog circa twintig méér voorkomen. Deze zogenoemde *rektrillingen* behoren echter niet alleen tot een totaal ander soort dan de hier besproken *buigtrillingen*, zijn voorts alle hoger dan de octaaf-partiaal en tenslotte zijn ze, en dat is doorslaggevend, bijzonder zwak en derhalve voor het muzikale gehoor volstrekt onbelangrijk. Slechts in extreme situaties kunnen ze zich manifesteren.

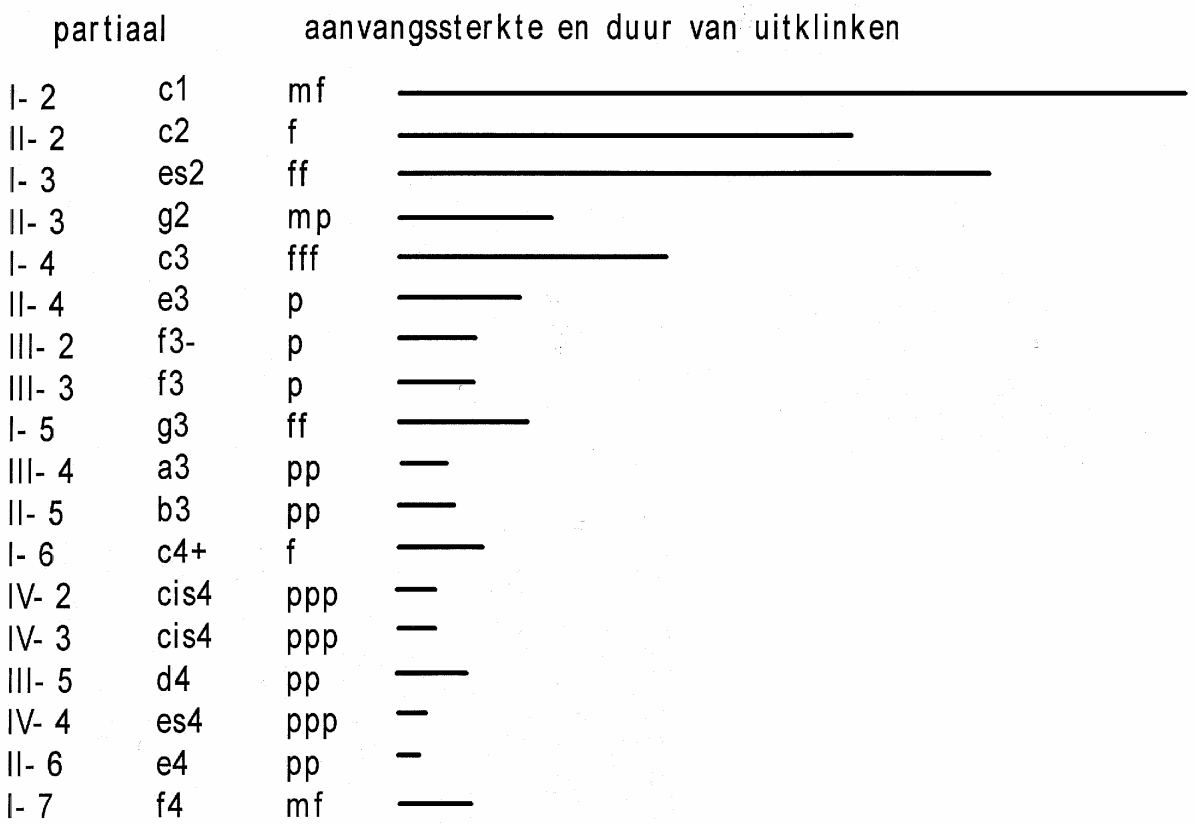
In de tweede kolom vindt men de gebruikelijke muzikale eigennamen, in de derde kolom de toonhoogtes met de voor de onderhavige klok gemeten afwijkingen in cents ten opzichte van de normaaltonen en in de laatste kolommen tenslotte een notatie welke aangeeft welk type verticale trillingsfiguur de desbetreffende boventoon heeft met de helft van het aantal knopen in de omtrek. De helft, omdat dit aansluit bij de gebruiken in andere akoestische literatuur. Men ziet overigens dat wij de grondtoon bij type I hebben ondergebracht en de priem bij type II. Daar zijn allerlei steekhoudende argumenten voor aan te voeren, die wij hier verder onbesproken laten. Met dit alles worden de fysische eigenschappen van een partiaal-

toon door twee cijfers volkomen bepaald. IV-6 betekent bijvoorbeeld dat het hier gaat om een boventoon die in verticale richting trilt volgens figuur 14-IV en in elk horizontaal vlak 12 buiken heeft afgewisseld door 12 knopen.

Naarmate men verder doordringt in de natuurkundige eigenschappen van de klok zal men zich terecht afvragen hoe de totale klok vervormt wanneer ze aangeslagen wordt, in het geval dus dat de klokkenwand voor alle partialen tegelijk trilt. Het antwoord lijkt eenvoudig. De klokkenwand trilt dan volgens een figuur die de optelling is van alle trillingsfiguren G, P, I, II, III, IV, V, Vl, VII, VIII, IX, X, XI enz. waarbij telkenmale rekening gehouden moet worden met de verfijning I-2, I-3 enz Het is simpel gezegd doch nauwelijks voorstelbaar! En zeker indien wij beseffen dat elke partiaal zijn eigen trillingstijd heeft.

4.4 Enkele muzikale consequenties

Wanneer men met een hamer de klok in verticale richting aftast en daarbij zijn aandacht fixeert op de kwint, zal men bemerken dat deze boventoon op de slagring nauwelijks en in de flank zeer sterk gehoord wordt, Doet men hetzelfde voor de kleine terts dan hoort men de sterkte vanaf de slagring geleidelijk teruglopen totdat die in het midden van de flank vrij-



Figuur 17: Aanvangssterktes en uitklinktijden van partialen in een relatieve schaal.

wel tot nul is gereduceerd. Daarboven keert deze partiaal zeer zwak terug. Nemen wij als laatste voorbeeld tenslotte de beide undeciemen. Deze zijn op de slagring nauwelijks te horen, daarboven vrij sterk om in het midden van de flank weer tot de gehoordrempel terug te lopen en tenslotte in de bovenflank, direct onder de schouder, heel sterk waarneembaar te worden.

Vergelijken wij dit met de verticale trillingsfiguren uit figuur 14 dan ligt de conclusie voor de hand. Blijkbaar wijzigt zich de sterkte van een boventoon op dezelfde wijze als de amplitudo van zijn trillingsfiguur. Vanzelfsprekend heeft dat verstrekkende gevolgen voor de praktijk. Indien wij namelijk bedenken dat de klok op de slagring wordt aangeslagen, betekent dit dat in het klankspectrum van de klok zullen domineren: grondtoon, priem en de tonen van groep I. Alle andere boventonen hebben een knoopparallel op de slagring. of althans in de directe nabijheid daarvan. Ze zullen derhalve slechts zwak gehoord worden. Wanneer wij vervolgens nog eens tabel 1 beschouwen en alleen die tonen eruit lichten die sterk zijn, dan krijgt men met weglating van centsafwijkingen het volgende overzicht.

grondtoon I-2	c
priem II-2	c^1
kleine terts I-3	es^1
octaaf I-4	c^2
duodeciem I-5	g^2
dubbeloctaaf I-6	c^3
dubbelundeciem 1-7	f^3
I-8	a^3
tripeloctaaf 1-9	c^4 enz.

Hierbij is echter geen rekening gehouden met het feit dat het gehoor minder gevoelig is voor hoge dan tonen uit het middenregister. Dit betekent dat van twee tonen met verschillende frequenties doch dezelfde intensiteit, de laagste het duidelijkst gehoord zal worden. Hieruit volgt dat hoewel de kwint II-3 in de slagring een knoopparallel heeft, deze boventoon, zij het zwakker dan zijn buren, toch gehoord wordt. Omgekeerd zal het tripeloctaaf I-9 hoewel tot type I behorend, aanzienlijk zwakker waargenomen worden dan zijn natuurkundige kenmerken doen vermoeden.

Met deze opmerkingen zal figuur 17 waarschijnlijk slechts weinig problemen geven. Het gaat daarbij om een willekeurig gekozen klok waarvan de grondtoon naar c^1 is getransponeerd. De eerste kolom geeft de notatie op grond van de trillingsfiguren, de tweede de getransponeerde toonhoogte. De derde kolom tenslotte de aanvangssterkte, dat wil zeggen de sterkte die de luisteraar juist op het moment van aanslag ervaart. Gelijktijdig is met de lengte van de horizontale lijn achter de desbetreffende partiaal de relatieve duur van uitklinken gegeven. In de aangegeven tijd wordt derhalve de sterkte geleidelijk aan tot nul gereduceerd. Ook hier blijkt bijzonder duidelijk dat de uitklinktijd van een boventoon afneemt naarmate zijn frequentie hoger is, hoewel de boventonen uit de eerste groep ook in hogere regionen hun sterkere positie ten opzichte van andere blijven behouden.

Intussen is ook de absolute duur van naklinken van zeer grote betekenis voor de schoonheid van een klok. Reeds lang bestaat hiervoor een vuistregel die de minimumtijd voor de grondtoon geeft. Deze zegt namelijk dat de uitklinktijd van de grondtoon in seconden op het gehoor gemeten en op een afstand ter lengte van de diameter van de klok tenminste gelijk moet zijn aan 0,6 maal de doorsnede in centimeters. De minimale nagalmtijd van de grond-

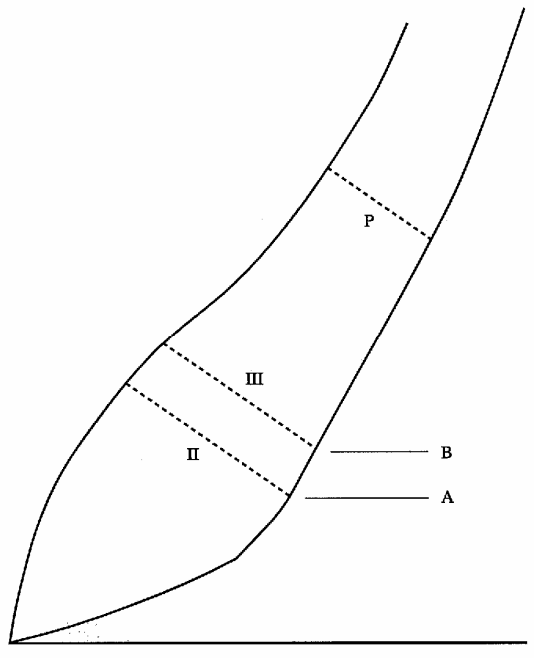
toon voor een klok met een diameter van 70 om bedraagt derhalve 0,6 x 70 = 42 seconden. Van een werkelijk goede klok mag men echter zonder bezwaar een factor 0,7 verlangen, dus minstens 49 seconden.

Zoals te begrijpen is, wordt die goede kwaliteit niet alleen bepaald door een juist ontworpen klok, doch ook door het juiste klokkenbrons en feilloos gietwerk. Deze factoren spelen bovendien een rol in de verhouding van de uitklinktijden der boventonen ten opzichte van die van de grondtoon. De waarden zoals die in figuur 17 genoteerd staan, gelden dan ook uitsluitend voor een klok van minstens aanvaardbare kwaliteit. Afwijkingen als gevolg van minder goed gietsel, slecht klokkenbrons enz. zullen in 4.13 nader onderzocht worden.

Wanneer wij op grond van de gegeven formule voor een klok van ongeveer 1,60 meter (slagtoon b, gewicht ca.2500 kg) de uitklinktijd van de grondtoon op 100 seconden stellen, geldt voor de andere belangrijke partialen het volgende overzicht:

grondtoon I-2	100 sec.
priem II-2	55 sec.
kleine terts 1-3	75 sec.
kwint II-3	20 sec.
octaaf I-4	30 sec.

Evenals figuur 17 dat duidelijk maakt, blijkt ook uit deze getallen dat de klankkleur van de klok zich tijdens het uitklinken voortdurend wijzigt. Want niet alleen verandert de onderlinge sterkte der boventonen doch bovendien en vooral gaat dat voor elk in een ander tempo. De grootste veranderingen treden vanzelfsprekend op wanneer een boventoon uit het klankspectrum verdwijnt. Bovengegeven klok klinkt bijvoorbeeld op het moment van aanslag totaal anders dan een halve minuut later, wanneer alleen nog maar de laagste drie partialen aanwezig zijn.

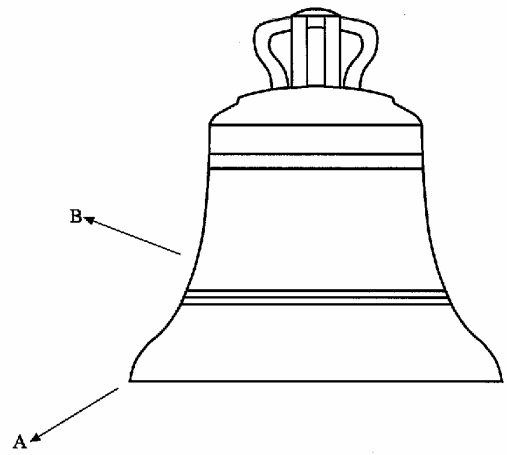


Figuur 18: Plaats van de knoopcirkels van priem, groep II en III.

In het bovenstaande was de klankkleur een gegeven grootheid waaraan niet te tornen valt. Toch is beïnvloeding ten goede of ten kwade zeer goed mogelijk. De verticale trillingsfiguren kunnen daarin een uitstekende gids zijn. In figuur 18 is namelijk met behulp van die figuren een deel van de klok getekend met daarop in puntlijnen de plaats van de knoopparallellen van de priem en van de tonen van het tweede en derde groep. Zou men de klok zéér precies in richting A aanslaan, dan zou in het klankspectrum géén kwint II-3, géén grote deciem II-4 enz. te bespeuren zijn. Zou men daarentegen in richting B aanslaan dan zouden genoemde boventonen wél tot ontwikkeling komen en de beide undeciemen (III-2/3) daarentegen niet. Hierin overigens kan men een voortreffelijk hulpmiddel vinden om bepaalde ontsierende elementen in de klank van

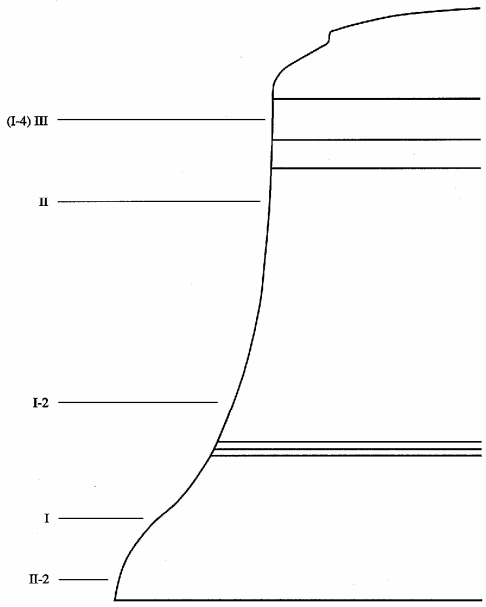
de klok te bestrijden, zoals een onzuivere kwint, met elkaar zwevende undeciemen enz. In het eerste geval zou het voldoende zijn in richting A aan te slaan, in het tweede geval in richting B. Wanneer zich dergelijke problemen echter niet voordoen en de klok derhalve correct gegoten en gestemd is, wordt het aanslagpunt gewoonlijk tussen A en B gekozen, op het dikste deel van de slagring derhalve.

De verticale trillingsfiguren kunnen ook in andere situaties hulp bieden. Bij de omschrijving van de wijze waarop de uitklinktijd van de grondtoon gemeten wordt, is bijvoorbeeld geen acht geslagen op de richting waarin die partiaal beluisterd moet worden. Toch bestaat er een onmiskenbaar verschil tussen richting A en B (fig.19). De trillingsfiguur maakt dat ook duidelijk. In richting B luistert men in het directe bereik van een buik; in richting A daarentegen niet. Het gevolg is dan ook dat men gemakkelijk een verschil van 10% in uitklinktijd kan meten. Daarom spreekt het vanzelf dat men bij dit soort metingen altijd dezelfde luisteraarplaats moet kiezen. De voorkeur gaat daarbij uit naar B, want daar klinkt de grondtoon het sterkst. Tevens moet men in de omtrek natuurlijk in de richting van een buikmeridiaan luisteren.



Figuur 19: Luisterrichtingen.

Voor de boventonen geldt iets soortgelijks. Er is echter ook een andere kwestie die de aandacht verdient en welke met behulp van de verticale trillingsfiguren elegant opgelost kan worden. Stel dat een onderzoeker de afzonderlijke boventonen één voor één wil beluisteren en daarbij niet kan beschikken over meetinstrumenten. Hij kan dan natuurlijk de klok op de slagring aanslaan, dus op de gebruikelijke manier, en vervolgens zijn oor pijnigen om in de complexe klokkenklank al die boventonen één voor één te isoleren. Werpt men echter vooraf een blik op de trillingsfiguren dan komt men snel tot een ander inzicht. Men neme namelijk een betrekkelijk lichte hamer en sla de klok op die plaats aan waar de te onderzoeken partiaal ten naaste bij een buik heeft. In figuur 20 is de meest gunstige richting met lijnen aangegeven. Mogelijk is hierdoor ook het misverstand ontstaan dat elke boventoon in een bepaald deel van de klok zou zetelen en daar ook gestemd zou moeten worden. Het zal duidelijk zijn dat dit een onterechte veronderstelling is, want elke boventoon is in elk deel van



Figuur 20: Luisterrichtingen.

de klok aanwezig. Elke boventoon is echter niet in elk deel van de klok even sterk aanwezig.

Men zal opmerken dat in figuur 20 in de bovenflank het octaaf I-4 tussen haakjes is geplaatst. Het is een alternatieve luisterrichting. Immers, weliswaar heeft deze boventoon in de slagring een buik, doch in de bovenflank wordt hij minder gestoord door sterke buren. Ook andere verfijningen zijn aan te brengen. Wil men bijvoorbeeld de grote deciem II-4 beluisteren en derhalve niet gestoord worden door zijn naaste buren, de beide undeciemen III-2/3, dan kan men het beste in de knoopparallel van groep III in de flank aanslaan. Weliswaar zit men dan niet precies in de buik van type II doch het voordeel is dat men de storende tonen van III uitgeschakeld heeft. Vanzelfsprekend gelden soortgelijke redeneringen voor de eerste groep in relatie tot de tweede en derde.

Het zal door voorafgaande uiteenzettingen duidelijk zijn dat de trillingsfiguren tot tal van interessante experimenten aanleiding kunnen geven. Daarom kan niet genoeg aangeraden worden die zelf te beproeven en varianten en uitbreidingen daarop te bedenken. Het verheldert in hoge mate het inzicht in de theoretische achtergronden van de klokkenklank.

4.5 Verschiltonen in de klokkenklank

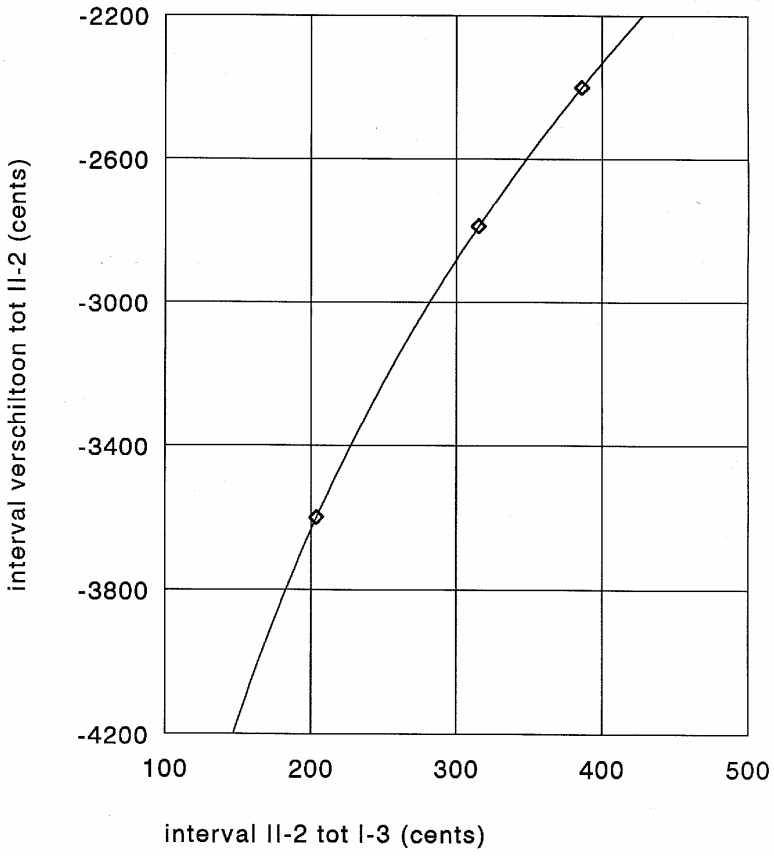
Wanneer een relatief kleine klok niet te zacht wordt aangeslagen, zal men bij zorgvuldig luisteren één of meer tonen opmerken die met geen mogelijkheid identiek gesteld kunnen worden met één der partiaaltonen. Blijkbaar zijn het tonen die in het gehoororgaan ontstaan. Naast de slagtonen die in 4.6 aan de orde komen, zijn dit in de eerste plaats *verschiltonen*.

Het verschijnsel verschiltoon kan het beste begrepen worden door uit te gaan van zwevingen. Indien twee tonen met bijna dezelfde frequentie gelijktijdig klinken, zal men zwevingen horen; de samenklank schommelt voortdurend in frequentie en klanksterkte. Het is derhalve een soortgelijk verschijnsel als het vibrato van de violist. Het tempo waarin de schommelingen plaats vinden, wordt bepaald door het verschil in frequentie tussen de beide deelnemende tonen. Stel dat dit verschil 2 Hz is, dan betekent dit dat de sterkte- en frequentievariaties in een tempo van twee maal per seconde geschieden. Wanneer de verschilfrequentie door het veranderen van één der hoofdtonen geleidelijk aan groter wordt gemaakt, zal een punt bereikt worden dat de zwevingen zó snel gaan dat ze als zodanig niet meer gehoord worden. In plaats daarvan hoort men dan een toon met die verschilfrequentie, de verschiltoon. Twee tonen met een frequentie van 300 resp. 500 Hz vormen in het gehoor derhalve een verschiltoon van 500 - 300 = 200 Hz. Of in tonen met weglating van centsafwijkingen: een d^1 en b^2 geven een verschiltoon g (g-klein).

Verschiltonen worden echter lang niet altijd gehoord. De hoofdtonen kunnen bijvoorbeeld zó laag zijn dat de verschilfrequentie buiten het hoorbare gebied valt. Bovendien moeten de hoofdtonen voldoende sterk van intensiteit zijn. Aldus is het ook te begrijpen dat alleen de grondtoon I-2 en de volgende drie tonen van groep I alsmede de priem II-2 tot het ontstaan van een verschiltoon kunnen bijdragen. Welke dit zijn, maakt het volgende overzicht duidelijk. Gemakshalve werken wij hierin tegenover getransponeerde tonen op c^1 met relatieve frequenties op basis van 500 voor c^1. De absolute frequentie van een c^1 is 261,626 Hz.

grondtoon I-2	c^2	500
priem II-2	c^2	1000
kleine terts 1-3	es^2	1200
octaaf I-4	c^3	2000
duodeciem I-5	g^3	3000

De verschiltoon tussen grondtoon en priem heeft een relatieve frequentie van 500 en valt derhalve samen met de grondtoon. Dit betekent dat deze verschiltoon bij goed gestemde klokken onopgemerkt blijft. Ditzelfde geldt ook voor de verschiltonen tussen de priem en het octaaf en het octaaf en de duodeciem. Deze zullen samenvallen met de priem. Anders is het echter gesteld met de verschiltoon tussen de priem en de kleine terts. Deze bedraagt namelijk 200 en zal aldus een As vormen, dat wil zeggen een grote deciem lager liggen dan de grondtoon. Vooral bij kleine klokken die voldoende hard worden aangeslagen. is deze toon zeer goed te horen. Hij biedt bovendien interessante perspectieven voor de controle van de inwendige zuiverheid van de klok. Het opvallende feit doet zich namelijk voor dat reeds bij kleine wijzigingen in het interval tussen priem en kleine terts, de verschiltoon vele malen meer verandert. In figuur 21 is dat aanschouwelijk voorgesteld. Op de horizontale as is het interval tussen priem en kleine terts uitgezet. Aangenomen wordt dat deze kan variëren tussen 200 cents (hele toon) en 400 cents (grote terts). Zulks kan bijvoorbeeld hetzij door een verschuiving van de terts, hetzij door verschuiving van de priem, dan wel een combinatie van beide. Op de verticale as is de positie van de verschiltoon gegeven, en wel in een notatie die gebaseerd is op c^1 voor de grondtoon, dus c^2 voor de slagtoon. Men kan gemakkelijk aflezen dat bij een interval van een hele toon tussen priem en terts de verschiltoon op C (C-groot) ligt, dus drie octaven onder de priem en slagtoon c^2. Indien genoemd interval echter een grote terts is, ligt de verschiltoon reeds één octaaf hoger, dus op c (c-klein). De afstand tussen de verschiltoon en de priem is dan nog slechts twee octaven. Samenvattend blijkt derhalve dat wanneer de afstand tussen priem en kleine terts van 200 naar 400 cents groeit, dus



Figuur 21: Verschiltoon tussen priem en terts. De punten zijn achtereenvolgens C, As en c bij slagtoon c^2.

over een hele toon, de verschiltoon één octaaf stijgt. Hiermee zal het ook plausibel worden dat reeds kleine afwijkingen in priem of kleine terts zich duidelijk in de ligging van de verschiltoon zullen manifesteren.

Het hier beschreven verschijnsel komt nog meer tot zijn recht bij een reeks kleinere speelklokken die in een gieterij staan opgesteld, dus van dichtbij beluisterd kunnen worden. Slaat men namelijk voldoende hard deze met halve tonen opklimmende klokken achter elkaar aan, dan moeten de verschiltonen volgens hetzelfde patroon volgen, dus chromatisch opklimmend. Doen zij dat niet, is er dus geen vloeiend verloop in de verschiltonen te constateren, dan kan men er zeker van zijn dat de priem en/of kleine terts in de desbetreffende klokken onzuiver zijn.

Aanzienlijk minder belangrijk is de verschiltoon tussen de kleine terts en het octaaf. Het verschil bedraagt 800. De daaruit resulterende toon zal derhalve een kleine sext as^{l} boven de grondtoon liggen. Door deze ingesloten positie wordt hij alleen bij zorgvuldig beluisteren opgemerkt. Hetzelfde geldt voor de verschiltoon tussen grondtoon en kleine terts. Met een waarde van 700 is dat ongeveer een tritonus, namelijk fis^{l}-17 cents boven de grondtoon. De conclusie is dan ook dat alleen de verschiltoon tussen priem II-2 en terts I-3 voor de praktijk werkelijk van belang is.

4.6 De primaire en secundaire slagtoon

Wanneer een inwendig onzuivere klok wordt aangeslagen en men beluistert haar op redelijke afstand, bijvoorbeeld op 500 meter, dan valt het niet moeilijk haar toonhoogte vast te stellen. De onzuiverheden blijken weliswaar te hinderen, doch spelen geen rol voor de toonhoogte van de klok. Herhaalt men het experiment bij andere klokken, dan treedt er bovendien een bepaalde wetmatigheid aan het licht. Deze luidt: de toonhoogte waarop een klok tijdens de aanslag ervaren wordt, ligt op een interval van één octaaf beneden de partiaal octaaf I-4. Deze toonhoogtegewaarwording noemt men *primaire slagtoon*, of kortweg *slagtoon*. De toevoeging *slag* is duidelijk. Immers, deze toon is uitsluitend tijdens de aanslag en kort daarna te horen. Hij duurt dan ook slechts enkele seconden,

Natuurlijk heeft men geprobeerd of de slagtoon wellicht een partiaal is dan wel een andere fysisch aantoonbare toon in het klankspectrum van de klok. Alle pogingen in die richting liepen op niets uit. De slagtoon wordt dan ook gevormd in het gehoororgaan van de mens en is derhalve als virtuele toon een psycho-akoestisch verschijnsel. Wij komen daar nog op terug.

In het begin van dit hoofdstuk werd gesteld dat de slagtoon niet afhankelijk is van inwendige onzuiverheden. In de volgende tabel wordt dat nader geïllustreerd. Men ziet daarin een viertal inwendig onzuivere klokken die alle een slagtoon c^{2} bezitten, dezelfde als de zuivere klok in kolom E. Die laatste zou ons overigens op het idee kunnen brengen dat de slagtoon identiek is aan de priem. Maar de klokken onder A t.m. D tonen het tegendeel aan. Bovendien valt nog te bedenken dat de slagtoon een andere klankkleur bezit dan de priem.

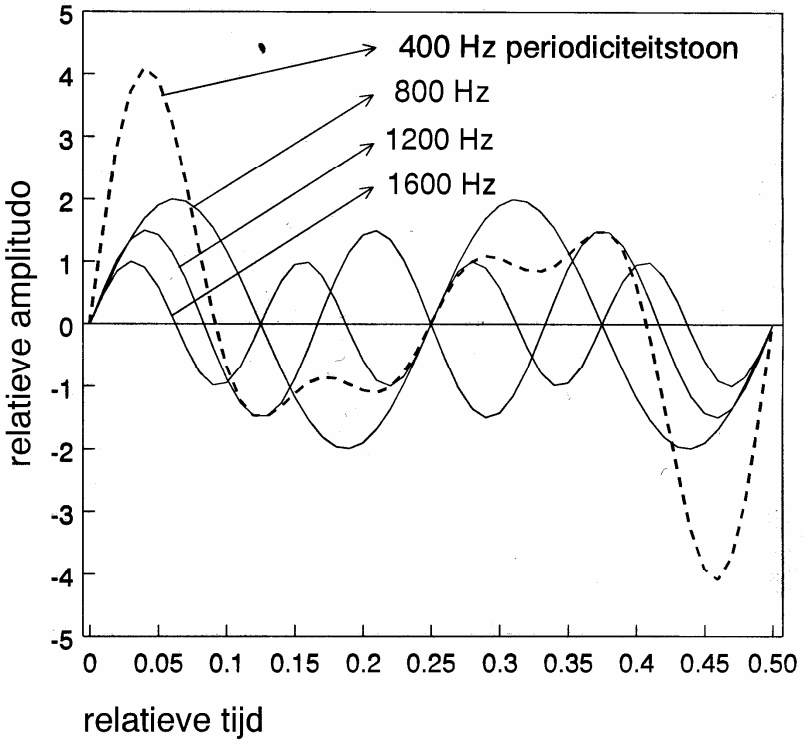
partiaal	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
grondtoon I-2	c^1	c^1	b	cis^1	c^1
priem II-2	b^1	cis^2	c^2	c^2	c^2
kleine terts I-3	es^2	es^2	es^2	es^2	es^2
kwint II-3	fis^2	gis^2	g^2	g^2	g^2
octaaf I-4	c^3	c^3	c^3	c^3	c^3
slagtoon	c^2	c^2	c^2	c^2	c^2

Natuurlijk wordt de bepaling van de slagtoon moeilijker naarmate men zich dichter bij de onzuivere klok bevindt. De ontstemde partialen kunnen dan een storende rol spelen, en zeker wanneer de priem onzuiver is. Nimmer echter wordt een gemiddelde toonhoogte waargenomen, van bijvoorbeeld een priem die te laag is en daarom de slagtoon zou verlagen.

Inwendige onzuiverheden kunnen belemmerend werken. Niettemin zijn er situaties denkbaar waarin dat voor een groot deel wegvalt. Stel bijvoorbeeld dat men een diatonische reeks klokken met correcte slagtonen heeft, dus met correcte octaven I-4, terwijl de overige partialen onzuiver zijn en bovendien op onderling verschillende wijze. Beluistert men elke klok afzonderlijk dan zal men weliswaar de slagtoon kunnen vaststellen, doch anderzijds gestoord worden door die onzuiverheden. Anders wordt dat echter wanneer de klokken als een reeks worden aangeslagen. Het gehoor stelt zich dan in op de diatonische serie en zal dan aanzienlijk minder last hebben van de inwendige onzuiverheden. Vandaar dat de primaire slagtoon ook wel eens melodietoon wordt genoemd.

Daar de slagtoon een psycho-akoestisch verschijnsel is en de gehoorgevoeligheid bij hoge frequenties minder wordt, zal het duidelijk zijn dat bij kleine klokjes de betekenis van de slagtoon gaandeweg afneemt en de rol van toonhoogtebepalend overgenomen wordt door de partialen zelf. De grens ligt ongeveer bij klokjes in het drie-gestreept octaaf. Daarboven wordt de toon van de klok bepaald door een combinatie van grondtoon, priem en octaaf. Maar op welke wijze dit geschiedt, is tot op heden onbekend.

Uiteraard heeft het niet aan pogingen ontbroken om de slagtoon te verklaren. In elk geval is men het erover eens dat de slagtoon een samenspel is van het gehoororgaan met één of meer sterke partialen, tonen dus van type 1. Zo meende men aanvankelijk dat de slagtoon de verschiltoon is tussen het octaaf I-4 en het duodeciem I-5. Nauwkeurige metingen hebben echter aangetoond dat dit in sommige gevallen dan wel zo moge schijnen, doch dat er talloze klokken zijn waarin die verschiltoon allerminst samenvalt met de slagtoon. Een andere theorie gaat ervan uit dat het gehoor tijdens de aanslag zo overstelpt wordt door boventonen dat dit een steunpunt moet zoeken en wel bij de op dat moment sterkst klinkende partiaal, dus het octaaf 1-4. Daar er echter meerdere tonen lager dan die partiaal aanwezig zijn, zou het gehoor zich steeds weer vergissen in de octaafhoogte en menen dat de partiaal octaaf I-4 één octaafinterval lager klinkt. Zonder enige twijfel is deze theorie van octaafvergissing de moeite waard, zij het dat ze noch te bewijzen, noch te weerleggen valt. Behalve de hier genoemde hypothesen zijn er ook andere verklaringsmodellen geopperd. Wij zullen die echter laten rusten omdat ze de toets der kritiek nauwelijks kunnen doorstaan. Liever wenden wij ons tot de theorie die het wél haalde ofschoon er aanvankelijk geduchte tegenstanders waren. Maar heden ten dage wordt algemeen aangenomen dat de slagtoon een *periodiciteitstoon* is die zich in ons gehoor vormt. Wat is er namelijk aan de hand?



Figuur 22: De vorming van een periodiciteitstoon.

Over de onderliggende theorie het volgende. Wanneer twee of meer tonen gelijktijdig klinken, kan het zijn dat de som van de trillingsfiguren een zekere periodiciteit toont. Het merkwaardige feit doet zich dan voor dat het menselijk oor ook deze periodiciteit als een toon ervaart, de periodiciteitstoon derhalve. Enkele voorbeelden mogen dit illustreren.

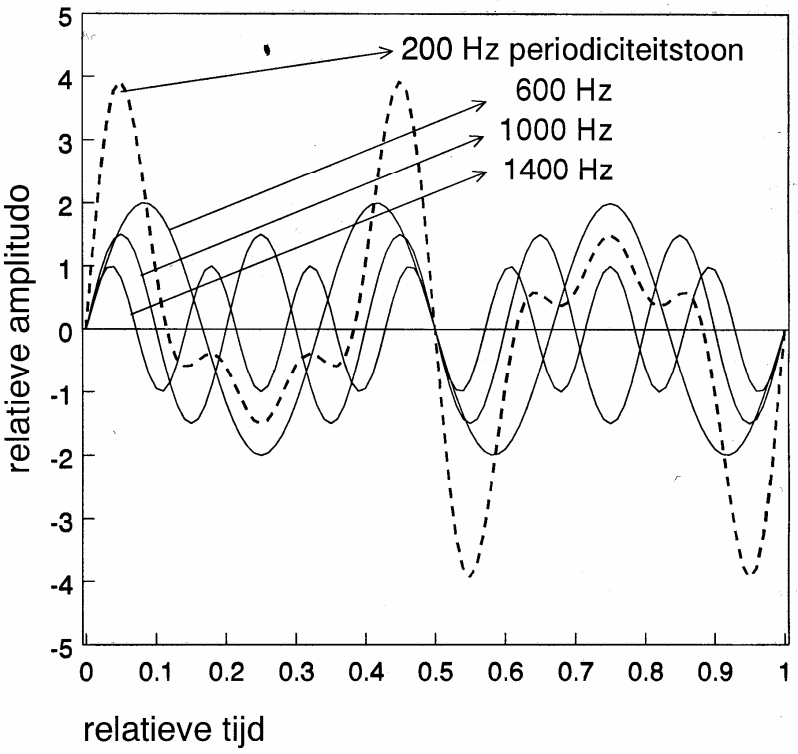
Drie tonen met frequentie van 800, 1200 en 1600 llz worden gelijktijdig gehoord. Gemakkelijk kan men berekenen dat wanneer de trilling van 800 Hz 2 perioden, van 1200 Hz 3 perioden en van 1600 Hz 4 perioden heeft gemaakt, een situatie is bereikt die identiek is aan het uitgangspunt. Figuur 22 kan dit verduidelijken. Men ziet de golfbewegingen van de drie deelnemende frequenties in een willekeurige sterkte met daar doorheen de som in de vorm van een gestreepte lijn. Gemakkelijk is in te zien dat na genoemde perioden de streeplijn zich in precies dezelfde vorm zal herhalen. Blijkbaar vertegenwoordigt deze streeplijn een periodiciteit, en wel een die de helft zo langzaam is als die van 800 Hz. De periodiciteitstoon heeft derhalve een frequentie van 400 Hz.

Natuurlijk kan men betogen dat 400 Hz de verschiltoon is van de frequenties 800, 1200 en 1600 Hz en dat derhalve de periodiciteitstoon identiek is aan de verschiltoon. Een ander voorbeeld kan dat echter logenstraffen. Stel men heeft tonen van 600, 1000 en 1400 Hz (fig.23). Hebben deze achtereenvolgens drie. vijf en zeven perioden gemaakt, dan zal het uitgangspunt weer bereikt zijn en zal alles zich herhalen. De frequentie van de overkoepelende periodieke trilling is derhalve 1/3 van 600 Hz, 1/5 van 1000 Hz en 1/7 van 1400 Hz dus 200 Hz. De verschiltoon is echter 400 Hz. Kennelijk zijn verschiltoon en periodiciteitstoon geen identieke verschijnselen. Het moge bovendien duidelijk zijn dat de frequentie van de periodiciteitstoon het grootste gemene veelvoud van de deelnemende partialen is.

Wanneer het bovenstaande op de klok wordt toegepast dan blijken, wanneer wij ons vanzelfsprekend beperken tot de sterke trillingen, de partialen octaaf I-4, duodeciem I-5 en dubbeloctaaf I-6 een periodiciteit te vormen. Hun verhoudingsfrequenties zijn namelijk 2:3:4 hetgeen resulteert in een periodiciteitstoon van l, dus één octaaf lager dan het octaaf I-4. De slagtoon zou dus de periodiciteitstoon zijn van het octaaf, de duodeciem en het dubbeloctaaf.

Natuurlijk kan men zich afvragen, uitgaande van deze theorie, of er nog meer slagtonen in de klokkenklank aanwezig zijn. Inderdaad blijkt dit het geval te zijn. Beschouwen wij namelijk de partialen van de eerste groep beginnend met het dubbeloctaaf. Men krijgt dan de reeks: c^4 (1-6) - f^4 (I-7) -a^4 (I-8) - c^5 (I-9).

Ook deze tonen vormen een periodiciteit. Ervan uitgaande dat ze verhoudingsfrequenties bezitten van 3:4:5:6, ligt de periodiciteit op l, dat wil zeggen een duodeciem onder het dubbeloctaaf, dus op f^2 bij een primaire slagtoon c^2. Deze *secundaire slagtoon* blijkt inderdaad te bestaan. Bij klokken zwaarder dan circa 1000 kg (primaire slagtoon f^1) is het een psycho-akoestische toon die onder de naam *metaalkwart* gevreesd en geducht wordt. Vele grote klokken blijken namelijk in hun klank een storend kwartinterval te bezitten. Hoe groter de klok, hoe ernstiger het verschijnsel kan worden, ja zo erg zelfs dat de klok een kwart-interval hoger klinkt dan bedoeld wordt. De metaalkwart of secundaire slagtoon overstemt dan de primaire slagtoon volledig. Het is overigens duidelijk waarom de secundaire slagtoon uitsluitend bij zwaardere klokken kan voorkomen. Bij middelgrote en kleine klokken liggen de partialen I-6 t.m. 1-9 zó hoog, dat de gehoorgevoeligheid te gering is om een periodiciteitstoon te kunnen vormen.



Figuur 23: De vorming van een periodiciteitstoon.

De secundaire slagtoon ligt op f^2, dus een kwart hoger dan de primaire slagtoon c^2. Niettemin zijn er luisteraars die hem eveneens of uitsluitend op f^3 horen. Waarom is niet duidelijk. In beide gevallen blijkt echter een octaafregel te gelden. De secundaire slagtoon of metaalkwart ligt namelijk op twee octaven, of één octaaf, beneden de dubbelundeciem f^4 (I-7).

Intussen vormt juist de octaafregel het zwakke punt van de identiteit slagtoon is periodiciteitstoon. In het voorafgaande namelijk spraken wij bewust niet over het feit dat het dubbeloctaaf I-6 in de regel enkele tientallen cents te hoog is. Dat hiermee de periodiciteit van de reeks octaaf - duodeciem - dubbeloctaaf aangetast wordt, moge duidelijk zijn. Onderzoekingen hebben echter aangetoond dat het dubbeloctaaf slechts een zeer bescheiden rol bij de vorming van de slagtoon speelt. Het zijn vooral en in de eerste plaats het octaaf en de duodeciem.

Een nog extremer voorbeeld, zij het gefingeerd, hebben wij in de volgende tabel gegeven. De daarin genoteerde partialen uit de eerste groep bezitten een opvallende merkwaardigheid. Ten opzichte van de ideale klok zijn de onderlinge intervallen namelijk groter geworden. Het interval kleine terts – octaaf meet geen 900 cents meer, doch 925 cents.

partiaal	**toon (cents)**	**frequentie (Hz)**	**verhoudingen**		
I-3	es^2-25	613,33	0,59		
I-4	c^3	1046,5	1,00	2,00	
I-5	g^3+25	1590,8	1,52	3,04	
I-6	c^4+50	2154,3	2,06	4,12	3,00
I-7	fis^4	2960,0	2,83		4,12
I-8	ais^4+25	3783.6	3,62		5,27
I-9	cis^5+50	4564,9	4,36		6,36

In dit verband is het van belang te wijzen op het beginsel dat partiaaltonen van eenzelfde groep altijd tezamen reageren, zij het met uitzondering van de partialen die de klokomtrek in vieren delen, dus de laagste van elke groep. Wordt bijvoorbeeld de duodeciem ten opzichte van het octaaf verhoogd, dus het interval tussen beide partiaal vergroot, dan zullen alle andere intervallen tussen de tonen van type I eveneens groter worden. Zulks is dus het geval geweest met de klok van de tabel. Het betekent tevens dat bijvoorbeeld een klok met een te lage kleine terts meestal een te hoge duodeciem heeft. Zou men omgekeerd van een klok verlangen dat het dubbeloctaaf juist ligt ten opzichte van het octaaf, dan zal de kleine terts gewoonlijk te hoog blijven en de duodeciem te laag. Het is een vuistregel die ook voor andere groepen geldt en daarom bij het onderzoek van klokken dikwijls nuttige diensten kan bewijzen. Maar er moet aan toegevoegd worden, dat deze regel minder geldt voor sterk afwijkende profielen.

De praktijk heeft aangetoond dat ook voor de klok uit bovenstaande tabel de octaafregel geldt. De primaire slagtoon ligt derhalve op c^2, de secundaire op fis^2. Bezien wij anderzijds de verhoudingen, dan blijkt van een periodiciteit weinig te zijn overgebleven. En er zijn talrijke klokken die dit verschijnsel min of meer bezitten. Moet daarom de theorie van de periodiciteitstoon althans voor deze klok afgewezen worden? Gehoorproeven geven daar een duidelijk antwoord op. In de eerste plaats blijkt, zoals eerder gezegd, dat de slagtoon vooral door het octaaf en de duodeciem wordt gevormd en in aanzienlijk mindere mate door het dubbeloctaaf. Mocht die partiaal niet zuiver zijn, dan is het effect daarvan nooit desastreus. Maar anders is dat voor de duodeciem. Genoemde proeven hebben namelijk geleerd dat naarmate de duodeciem meer van zijn reine waarde (702 cents) afwijkt, de slagtoon minder duidelijk wordt om geheel te verdwijnen als de duodeciem vijftig cents te hoog of te laag is (752 of 652 cents). Dan ook komen tijdens de aanslag alle hoge partialen naar voren met alle kwalijke gevolgen van dien voor de klankkleur. Zo'n klok klinkt lelijk. De slagtoon heeft derhalve niet alleen de functie van toonhoogtebepalend, maar ook om tijdens de aanslag de dissonante boventonen te maskeren en daardoor een fraai timbre te bewerkstelligen. Wij komen daar bij de bespreking van de grote terts-klok in hoofdstuk 4.16 uitvoerig op terug.

Maar waarom hebben het overgrote deel van de West-Europese klok een duidelijke en daardoor aangename slagtoon? Het antwoord is simpel. De profielen in dit deel van Europa

verschillen niet fundamenteel van elkaar. Zeker er zijn verschillen waardoor vooral de grondtoon en/of de priem uit de pas loopt, doch zolang het klokprofiel de globale maten van het algemeen aanvaard profiel heeft, kan men ervan verzekerd zijn dat het octaaf en de duodeciem op vrijwel een kwint van elkaar liggen en derhalve een duidelijke slagtoon weten te vormen. Die stabiliteit van het interval tussen beide partialen heeft alles te maken met het feit dat ze tot dezelfde groep I behoren zodat, wil men beide tonen uit elkaar drijven, zéér forse profielveranderingen nodig zijn. En wederom verwijzen wij naar hoofdstuk 4.16 over de grote tertsklok.

Wenden wij ons tenslotte nog even tot de secundaire slagtoon. In het voorafgaande bleek reeds dat die slagtoon niet altijd op een kwart boven de primaire slagtoon behoeft te liggen. Al naar gelang de ligging van 1-7 blijkt hij te kunnen variëren tussen e^2 en fis^2. In het eerste geval is de partiaal 1-7 derhalve gedaald naar e^4. Dit betekent dat de intervallen van de boventonen uit groep 1 zijn ingekrompen. Hieruit volgt weer dat een klok met een secundaire slagtoon die op een grote terts ligt, gewoonlijk een te hoge kleine terts-boventoon zal bezitten, een te lage duodeciem enz.

4.7 Het ontwerpen van de klok

Over het ontwerpen van een klok heerste vroeger een hardnekkig misverstand. Veelal wordt namelijk verondersteld dat het profiel van een klok uitsluitend door middel van berekeningen tot stand komt. Voldoende zou derhalve zijn te weten welke de ligging van de partialen in de toekomstige klok moet zijn om vervolgens met behulp van bepaalde natuurkundige theorieën het profiel te kunnen berekenen. Maar tot ver in de jaren tachtig van de vorige eeuw was het tegendeel het geval. Want pas toen zou dankzij de computer zich een ware revolutie in het ontwerpen van de klok voltrekken. Voorlopig echter wenden wij ons tot de klassieke manier, omdat kennis van die methode nog altijd onontbeerlijk is om per computer een klok te kunnen ontwerpen.

Voorheen was het dus de empirie die bij het ontwerpen te hulp werd geroepen. Gelukkig kon daarbij uit een rijke ervaring geput worden. De torens immers herbergen een haast onuitputtelijke schat aan goede en natuurlijk ook minder goede klokken. Voldoende zou derhalve zijn dat de gieter een mooi klinkende klok zo zorgvuldig mogelijk kopieert. Maar dat is wat al te simpel gesteld, want elke gieter zal het profiel naar eigen inzicht wat wijzigen. Maar heeft dat zin? Het antwoord lijkt ontkennend te moeten zijn, want wanneer men de profielen van hedendaagse beiaardgieters met elkaar vergelijkt, zij het niet die uit Engeland, dan ontlopen ze elkaar niet erg veel. De verschillen in klankkleur tussen de gieters lijken dan ook tot andere factoren teruggebracht te moeten worden, bijvoorbeeld de kwaliteit van het gietwerk. Toch vragen wij ons af welke empirische regels de gieter behulpzaam zijn om door hem gewenste kleine wijzigingen in een profiel aan te brengen. Vooraf echter moet afgesproken worden aan welke eisen een klok minimaal dient te voldoen, eisen die in de geschiedenis gegroeid zijn en zonder welke de klok geen goede klok zou zijn.

De klok moet aangenaam klinken, dat wil zeggen, ze moet van een redelijke inwendige zuiverheid zijn en geen storende en scherp klinkende boventonen bezitten. Met betrekking tot het laatste speelt, wanneer wij afzien van de klepel, het type brons en de kwaliteit van het gietwerk een belangrijke rol. Wij komen daar in 4.13 op terug. Maar ook het model kan van

beslissende invloed zijn. Gemakkelijk kan men namelijk inzien dat een te dunne klok een plaatachtig karakter kan krijgen. Omgekeerd is de kans niet uitgesloten dat een veel te dikke klok een weinig welluidend en scherp timbre bezit. Kennelijk bestaat er een relatie tussen de sterkte van de partialen en de wanddikte. Maar daar blijft het niet bij. In het verleden is namelijk ook vastgesteld dat vooral voor een te dikke klok het ideale klokakkoord zoals omschreven in 4.1 nauwelijks of in het geheel niet te verwezenlijken is. Slechts de gevolgen van een iets dunnere of dikkere wand kunnen in de boventoonstructuur door middel van profielwijzigingen opgevangen worden. In meer extreme gevallen is dat echter ondenkbaar.

Wanneer wij dit alles in concrete getallen omzetten, dan betekent dit dat een klok met een doorsnede van 77 cm zowel een bes^1 (dunne wand) als een d^2 (dikke wand) kan zijn. Het ideaal ligt echter bij c^2. Hiermee ook zijn de overige klokken door middel van het principe van de dynamische gelijkvormigheid bepaald **(**zie 6.1). Dit alles geldt overigens alleen maar voor niet te kleine klokken. Voor hoog klinkende worden namelijk andere regels gehanteerd (zie 7.2).

Het basismodel staat dus vast. Het werd ontleend aan voorbeelden in torens waarvan men weet dat daarin het klokakkoord gerealiseerd is of alsnog gerealiseerd kan worden. Dit akkoord, en wij herhalen het nog eens, moet minstens het volgende beeld bezitten:

grondtoon I-2	c^1
priem II-2	c^2
kleine terts 1-3	es^2
kwint II-3	g^2
octaaf I-4	c^3

Bij deze presentatie gaan wij vooralsnog voorbij aan de vraag of de inwendige stemming van een klok volgens de hedendaagse evenredig zwevende stemming moet zijn, dan wel volgens een historische stemming. Nu stellen wij slechts vast dat alleen deze tonen de klok een ondubbelzinnige toonhoogte kunnen geven. De grondtoon, priem en het octaaf werken immers samen met de slagtoon c^2, terwijl de terts es^2 en de kwint g^2 toegevoegde harmonischen zijn die kleur aan de klank verlenen. Natuurlijk kan dit niet impliceren dat men de hogere boventonen aan hun lot kan overlaten. Een interessant probleem is bijvoorbeeld de vraag hoe de relatie moet zijn van de duodeciem 1-5 en het dubbeloctaaf 1-6 ten opzichte van het octaaf I-4 en daarmee de primaire slagtoon. Opgemerkt dient dan te worden dat in dit vraagstuk ook de kleine terts 1-3 betrokken moet worden. Immers, de tonen van eenzelfde groep werken vrijwel steeds gezamenlijk. Wordt één interval in zo'n groep bijvoorbeeld verwijd, dan zullen de andere volgen. Passen wij dit toe op de eerste groep dan stellen wij allereerst vast dat de navolgende reeks I-3 t.m. I-6 goed te realiseren is en daarom ook het meest voorkomt:

es^2 c^3 g^3 c^4+

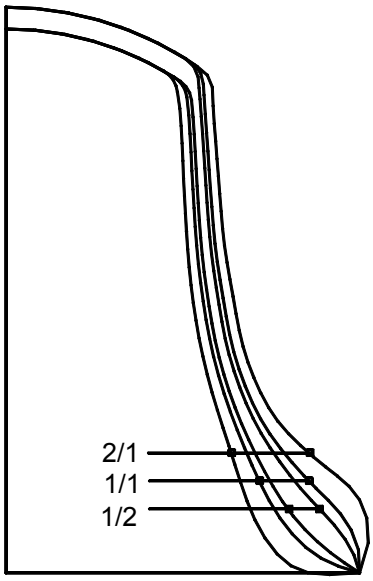
Zou men daarentegen het dubbeloctaaf juist wensen te leggen, dan zou men ten opzichte van het octaaf I-4 ten naaste bij het volgende beeld krijgen:

es^2+ c^3 g^3- c^4

Dit gaat dus ten koste van de terts en de duodeciem. Het is daarom slechts met extreme profielwijzigingen dat deze vier boventonen zuiver zijn te leggen.

Een ander probleem is de reeks grote deciem e^3 (II-4), eerste undeciem f^3- (III-2) en tweede undeciem f^3+ (III-3). Komen deze tonen namelijk te dicht bij elkaar, dan kunnen er tijdens de aanslag en kort daarna onaangename zwevingen in de klokkenklank ontstaan.

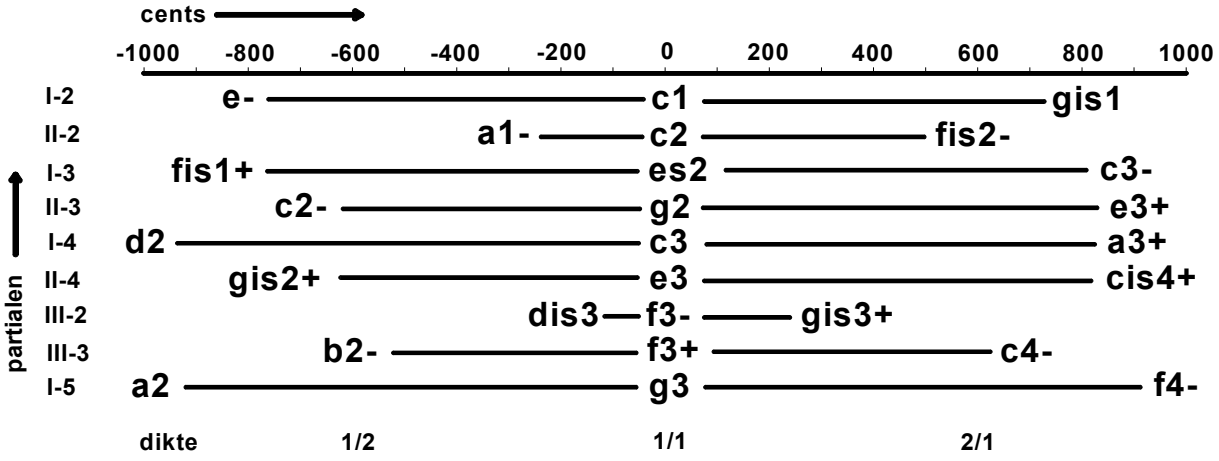
Daarom lijkt het verlagen van de grote deciem e^3 tot een kleine es^3 een optie en dit temeer omdat daarmee een octaafrelatie met de kleine tertspartiaal es^2 ontstaat. Maar men diene zich vooraf te vergewissen of deze ingreep niet elders in de klank zijn consequenties heeft. Een te lage deciem bijvoorbeeld zal maar al te vaak samengaan met een te lage kwint.



Figuur 24: Verdunnen en verdikken.

Met dit alles zal het duidelijk zijn dat het ontwerpen van een klok niet een kwestie is van het zo juist mogelijk formuleren van het ideale klokakkoord en verder maar aan te nemen dat een dergelijke klok zender bezwaar te maken is. Integendeel, het ontwerpen van een klok bestaat uit het zo gunstig mogelijk gebruik maken van dikwijls tegenstrijdige mogelijkheden opdat het beste compromis verkregen wordt. Vandaar ook dat elke klokkengieten zijn eigen ideaal heeft, derhalve een persoonlijke opvatting van dat compromis.

Teneinde een klok succesvol te kunnen ontwerpen moet men dus een goed inzicht bezitten in de consequenties van modelveranderingen. De gieter dient derhalve te weten wat het effect op de ligging der partialen zal zijn wanneer hij een bepaalde wijziging aan het profiel aanbrengt. In figuur 24 is daarvan het meest eenvoudige voorbeeld gegeven. Drie proefklokken met diktes van 1/2 maal normaal, normaal en 2/1 maal normaal werden in hun eigenfrequenties zorgvuldig nagemeten. Figuur 25 geeft het resultaat in een geschematiseerde vorm. De klok met normale dikte heeft dus de gebruikelijke toonopbouw. Deze staat van boven naar beneden in het midden van de tabel genoteerd. Links ziet men het effect van een wandverdunning tot 1/2 van de oorspronkelijke waarde. Hierbij geeft de lengte van de horizontale lijn de toondaling aan. In de bovenste regel kan die in cents afgelezen worden.



Figuur 25: Verschuiving van partialen bij dikte 1/2 - 1/1 - 2/1.

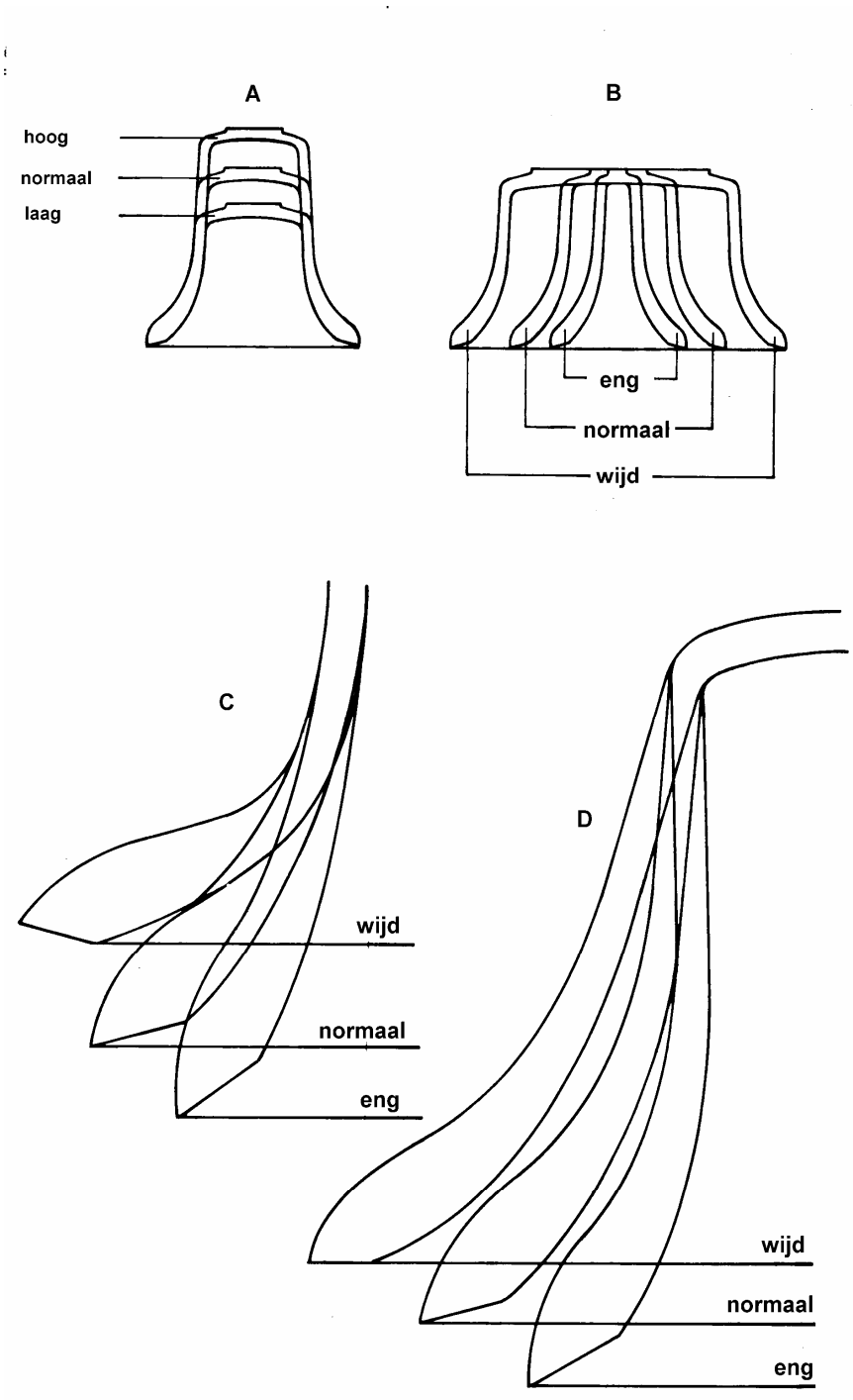
Het meest opvallende is wel dat de klok geheel ontstemd raakt. De vijf laagste partialen hebben namelijk bij een halvering van de dikte en wanneer wij het octaaf gemakshalve op c^3 stellen, de volgende onderlinge relatie gekregen:

d^1- g^2- e^2+ bes^2- c^3.

Het is daarmee een totaal onbruikbare klok geworden. Iets dergelijks geldt, zoals de figuur laat zien, voor een verdikking tot 2 maal de oorspronkelijke waarde. Oorzaak schuilt in het feit dat de partialen elk op geheel eigen wijze op een wandverdunning dan wel verdikking reageren.

Uiteraard wordt in de praktijk met dergelijk extreme variaties nooit gewerkt. Maar door middel van interpolatie zal zo'n overzicht de gieter wel in staat stellen de gevolgen van kleine diktewijzigingen te voorspellen c.q. te gebruiken teneinde bepaalde veranderingen in het klankspectrum te effectueren. Nochtans kan hij niet volstaan met de kennis van slechts één profielvariatie, integendeel, wil hij met succes klokken kunnen ontwerpen dan zullen hem ook andere ter beschikking moeten staan.

Enkele zijn in figuur 26 getekend. In A ziet men uitsluitend hoogtevariaties. In B diameterveranderingen. In C wordt de slagring zowel naar buiten als naar binnen gebogen, terwijl in D dit voor de gehele flank wordt gedaan. Veruit de belangrijkste en meest gehanteerde variaties zijn echter de modelwijzigingen die bestaan uit plaatselijke wijzigingen in de wanddikte. Het gevolg voor de ligging der parti-



Figuur 26: Profielvariaties.

alen kan men in grafieken verenigen zodat men nauwkeurig kan aflezen wat de consequentie is van een plaatselijke wandverdunning dan wel verdikking. Aldus kan de gieter zeer subtiele wijzigingen in het klankspectrum van de klok aanbrengen, Het belang van dit type grafieken blijkt bovendien uit het feit dat ze ook en vooral bij het stemmen van de klok gebruikt worden. Dit is het onderwerp van 4.8.

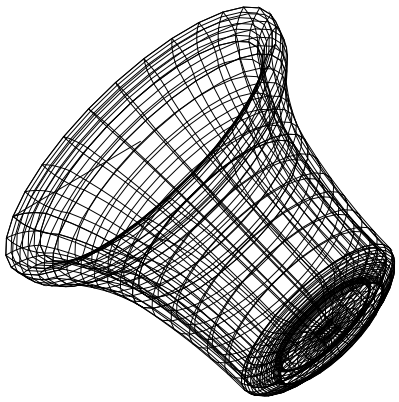
Rest nog de computer zoals die heden ten dage in een beperkt aantal klokkengieterijen wordt gebruikt. Er zijn twee mogelijkheden om die bij het ontwerpen te gebruiken. De eerste is dat een bepaald profiel snel doorgerekend kan worden. Want moesten voorheen van een nieuw ontworpen klok eerst één of meer proefmodellen gegoten worden, dankzij de computer is dat niet meer nodig. De tweede toepassing bestaat eruit dat de computer kan worden opgegeven welke toonstructuur een nieuw type klok dient bezitten, waarna deze uitrekent welk profiel daarbij behoort.

Beginnen wij met de eerste toepassing. Voor het berekenen van de eigenfrequenties, dus de partialen, wordt gebruik gemaakt van computerprogramma's die op de zogenoemde *eindige elementen-methode* zijn gebaseerd. Dergelijke programma's hebben in de techniek vele toepassingen. Ze kunnen in twee hoofdgroepen ingedeeld worden. In de eerste groep rekent het programma de sterkte van een constructie uit, bijvoorbeeld van een brug, een hijskraan, maar desgewenst ook van een klokkenstoel. In de tweede groep staan de eigenfrequenties van een constructie centraal, bijvoorbeeld van een brug met tuien, een toren, maar ook van de trillende klok.

De werkwijze daarbij is als volgt. Allereerst wordt het te onderzoeken object in een groot aantal virtuele kleine blokjes, elementen genaamd, opgedeeld. Voor een klok ligt dat aantal in de orde van grootte van minstens duizend. Figuur 27 laat een klok zien die in dergelijke elementen is opgedeeld. De klok is gekanteld om de elementen beter zichtbaar te maken. Vervolgens wordt voor elk element een aantal algebraïsche vergelijkingen geformuleerd die iets zeggen over bijvoorbeeld de vervorming van het element door een externe kracht dan wel als gevolgen van het vibreren. Daarna worden al die elementen weer als één object beschouwd teneinde zowel de kinetische energie tijdens het trillen van de klok te kunnen berekenen als de potentiële energie tijdens rust. In de laatste stap worden hieruit de eigenfrequenties berekend.

De rol van de computer in dit proces is het vermogen om duizenden vergelijkingen in een handomdraai op te lossen, een karwei dat handmatig onmogelijk is. Maar voor een computer is het berekenen van een klok een kwestie van seconden.

Het zal duidelijk zijn dat het grote voordeel bestaat uit snel inzicht in de akoestische consequenties van een bepaald profiel. Maar toch blijven de klassieke regels over het ontwerpen noodzakelijk. De klokkengieter moet dus weten hoe hij zijn klokmodel moet wijzigen teneinde het gewenste doel te realiseren. Kortom, volgens deze methode is de compu-



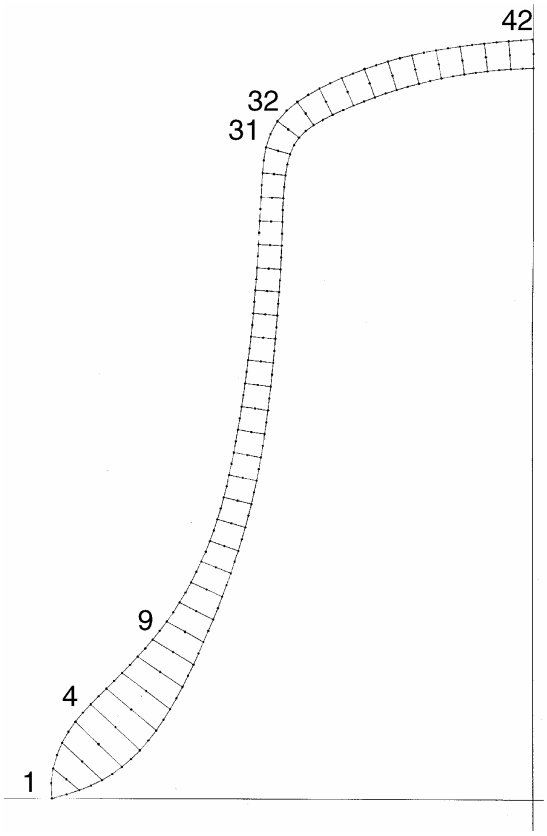
Figuur 27: Een klok opgedeeld in elementen.

ter een geweldig hulpmiddel, maar hij ontwerpt nog steeds geen klok. Hij berekent slechts de partialen van een profiel dat het programma krijgt aangeboden.

Maar hoe anders is dat bij de tweede toepassing van de computer. In dat geval wordt er niet alleen gewerkt met de eerder genoemde eindige elementen-methode voor de berekening van de partialen van een profiel, doch bovendien met een *optimalisatieprogramma* dat zoekt naar een profiel dat optimaal aan het gewenste doel beantwoordt. De klokkengieter geeft het programma een min of meer arbitrair basisprofiel alsmede het gestelde doel voor de laagste vijf partialen, bijvoorbeeld een grote terts-klok met de tonen c^1 c^2 e^2 g^2 c^3. De gang van zaken is dan als volgt:

Allereerst rekent het eindige elementen-programma de frequenties van het basisprofiel uit. In het algemeen zullen die nog niet overeenstemmen met het gestelde doel. Om die reden wordt het profiel naar het optimalisatieprogramma geleid dat volgens een bepaalde wiskundige methodiek wijzigingen in het profiel aanbrengt. Dat profiel wordt vervolgens op eigenfrequenties berekend. De ervaring leert dat het doel dan nog steeds niet bereikt is, hoewel het wel een stapje dichterbij is gekomen. Om die reden wijzigt het optimalisatieprogramma nogmaals iets aan het profiel, het wordt vervolgens weer op frequenties berekend enz. Stapsgewijs wordt derhalve het doel bereikt, althans als dat doel ook daadwerkelijk mogelijk is! Want dat is lang niet altijd het geval.

De hier geschetste werkwijze staat bekend als en iteratief proces. Elke optimalisatie van het profiel alsmede de berekening daarvan vormt een iteratie. Teneinde het gestelde doel te bereiken zijn honderd iteraties eerder regel dan uitzondering. Ook het stemmen van een klok is een iteratief proces, dus met kleine gecontroleerde stapjes naar het doel toe werken.

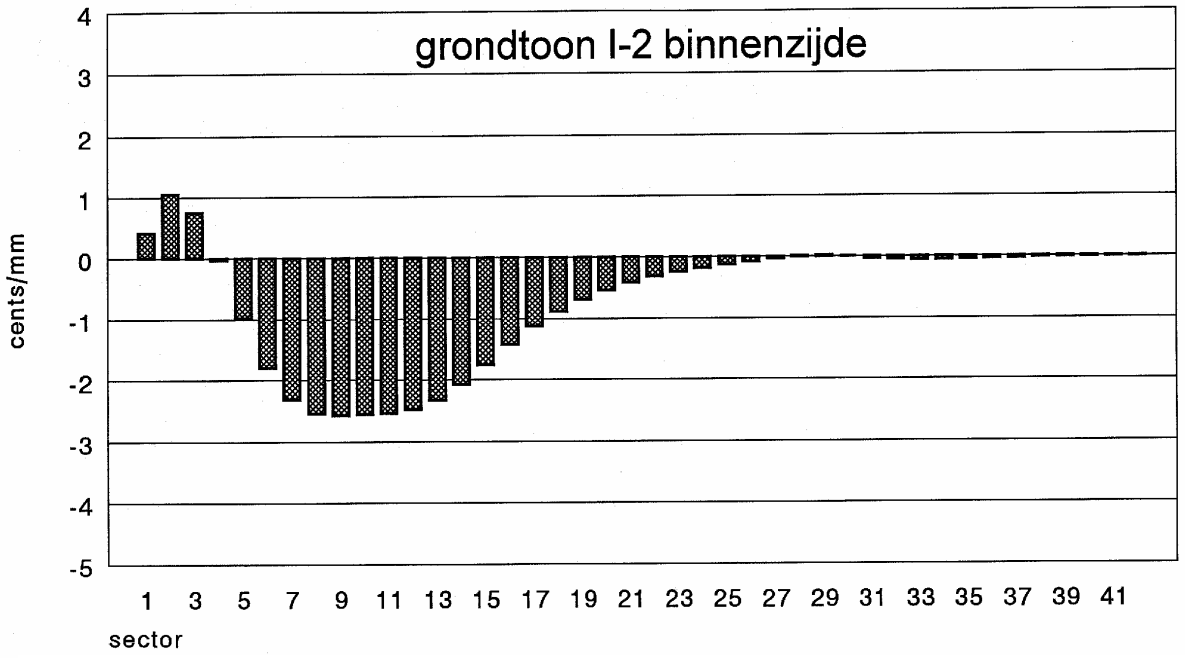


Figuur 28: Sectoren binnen- en buitenzijde.

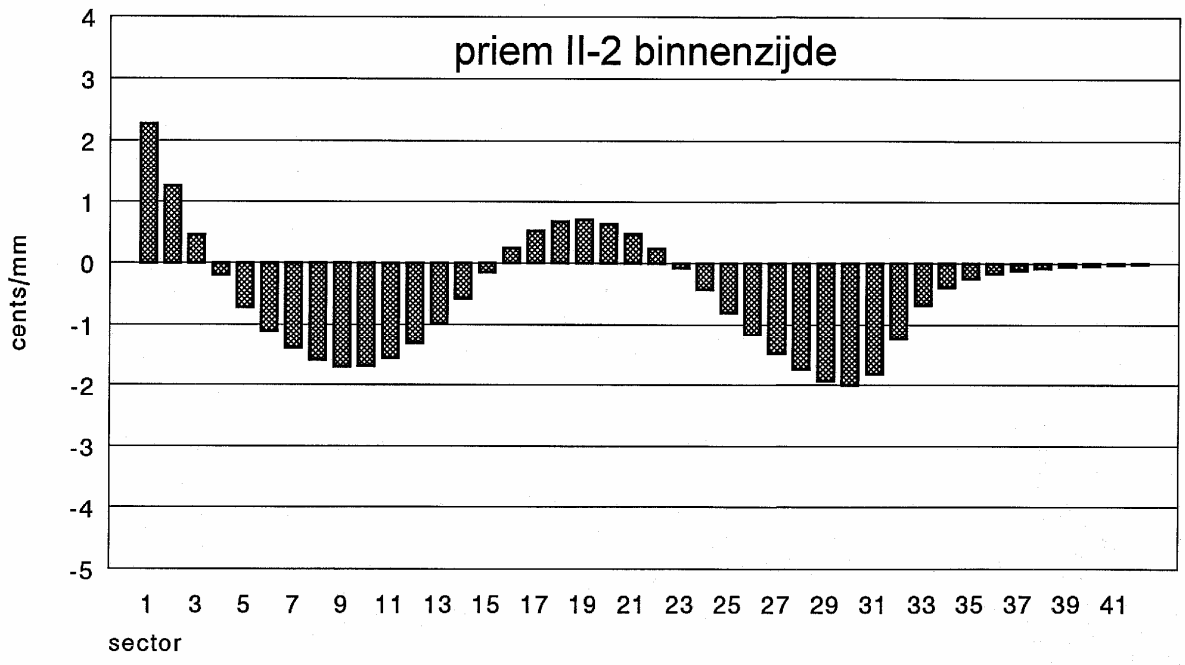
4.8 Het stemmen van de klok

Zoals men uit de verhandeling over het vormen en gieten ongetwijfeld begrepen zal hebben, is het nauwelijks denkbaar dat de gegoten klok zelfs met inachtneming van de krimp van het brons tot in alle details identiek is met de ontworpen klok. De gebezigde techniek is daar namelijk niet voldoende fijn voor. Slechts met heel veel moeite zou men een klok kunnen gieten die heel dicht bij het ontworpen profiel uitkomt. Voor luidklokken is dat stellig voldoende, doch voor beiaardklokken die ondubbelzinnige toonhoogtes moeten bezitten en zonder storende dissonanten ook samen moeten spelen, is dat niet voldoende. Dit wordt nog duidelijker indien wij beseffen dat wanneer de gegoten klok 1% dunner van wand is dan beoogd werd, haar gemiddelde toonhoogte circa 15 cents te laag zal zijn. Om dergelijk soort moeilijkheden te vermijden wordt

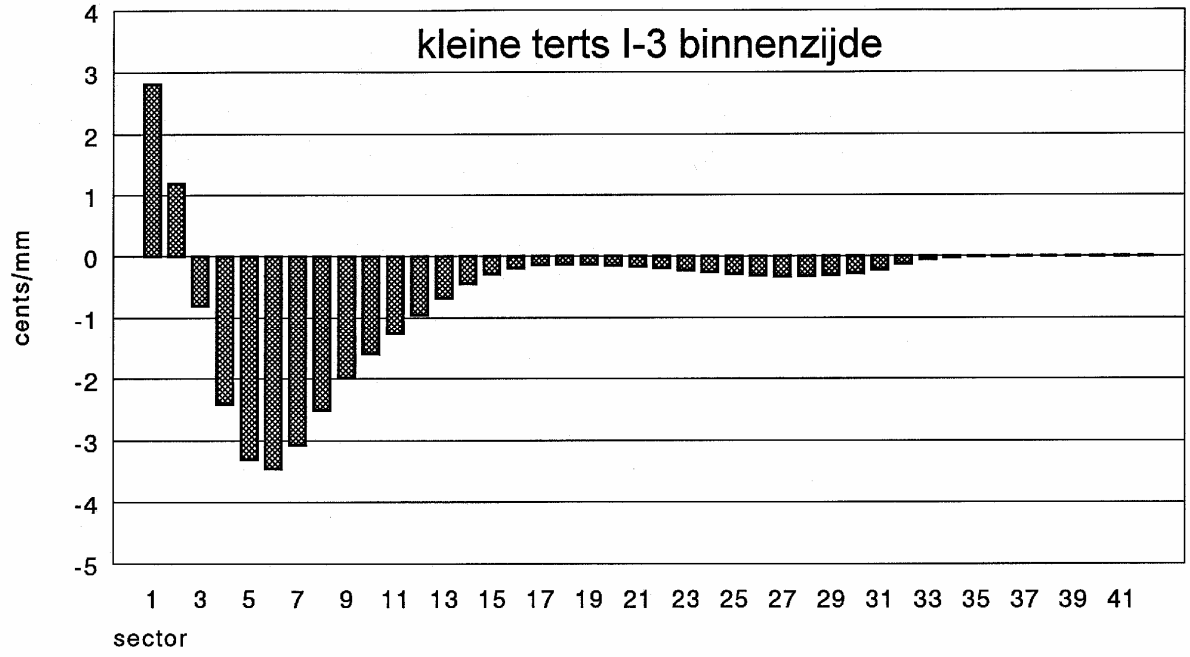
het juiste profiel aan de binnenzijde met enkele procenten verdikt. Gebeurt er dan tijdens het vormen en gieten iets waardoor de wand dunner zou worden dan bedoeld werd, dan wordt dat ruimschoots opgevangen door de aangebrachte verdikking. Dat teveel noemt men daarom *stemreserve*. Dit impliceert derhalve dat de gegoten klok te hoog van toon zal zijn. En vandaar dat de klok gestemd moet worden.



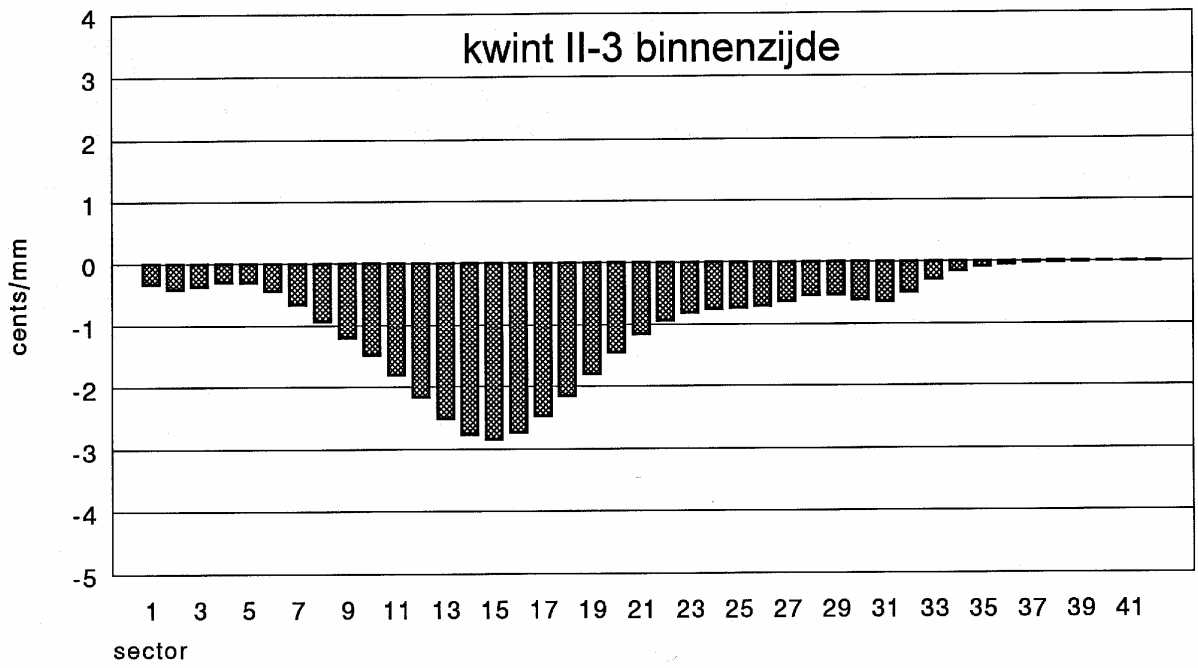
Figuur 29: Stemgrafiek grondtoon.



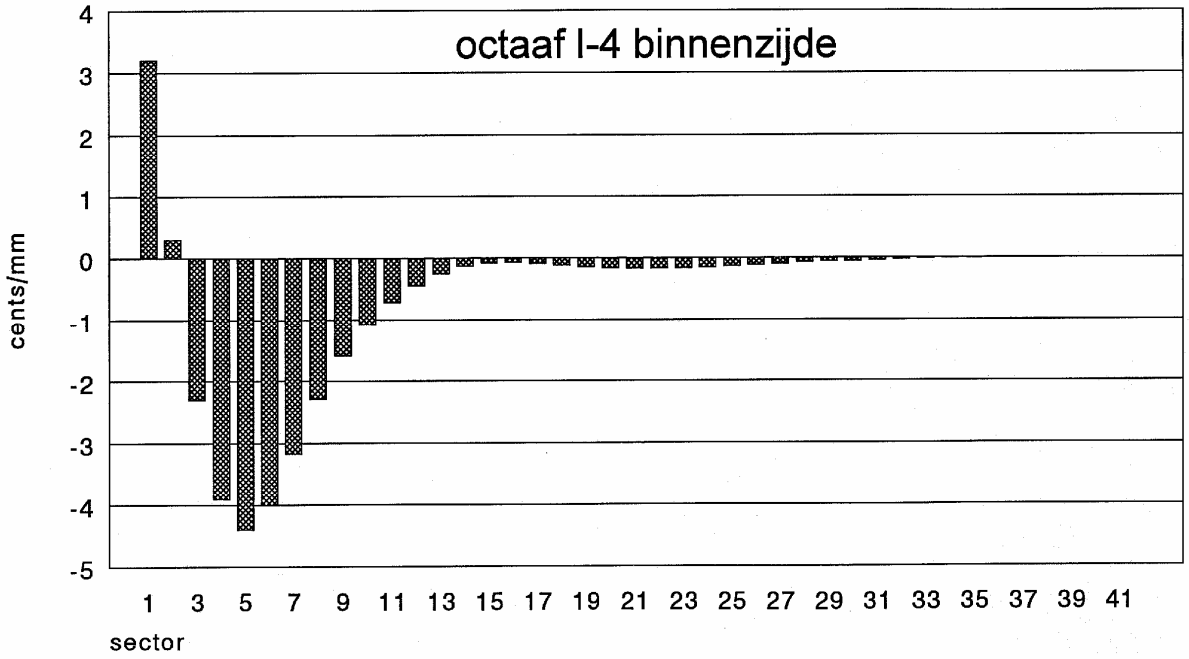
Figuur 30: Stemgrafiek priem.



Figuur 31: Stemgrafiek kleine terts.



Figuur 32: Stemgrafiek kwint.

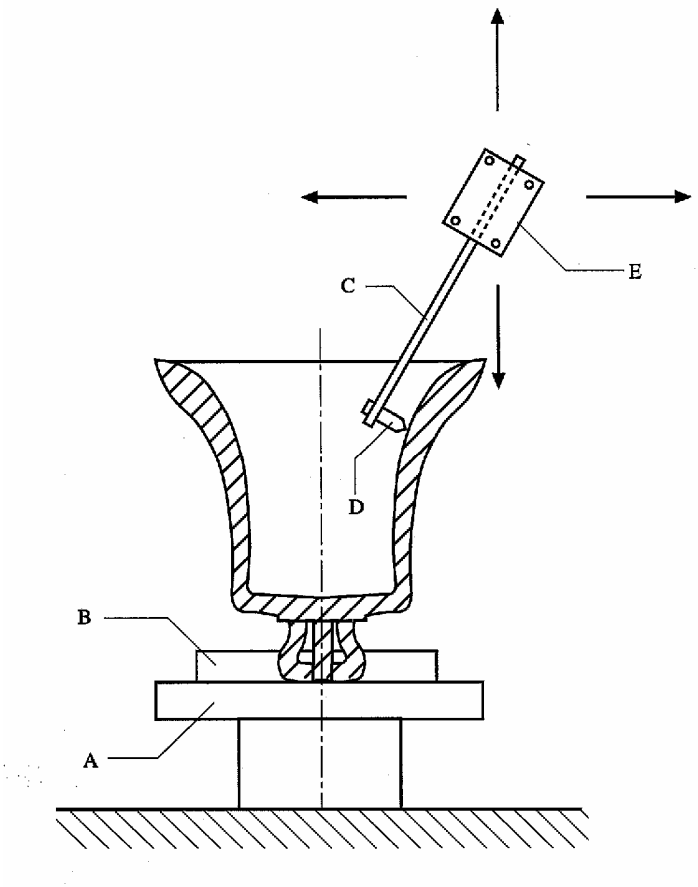


Figuur 33: Stemgrafiek octaaf.

Het stemmen zou men kunnen formuleren als een profielverandering ná het gieten in de vorm van plaatselijke wandverdunningen. Met het oog op versieringen, opschriften en een glad klokoppervlak kan dit natuurlijk alleen maar aan de binnenzijde. Voorts is een willekeurig gekozen verdunning geheel uit den boze. Weliswaar zal daarmee de toon van de klok dalen, doch figuur 25 toont anderzijds duidelijk aan dat elke partiaal op strikt eigen wijze op een verdunning reageert. Iets soortgelijk geldt ook voor de plaats waar brons wordt weggenomen. Het maakt bijvoorbeeld nog al wat uit of brons op de slagring wordt weggedraaid dan wel in de schouder van de klok. Het octaaf I-4 bijvoorbeeld zal bij een verdunning van de slagring sterk dalen, doch niet reageren op het verdunnen van de schouder. De priem II-2 daarentegen zal op de slagring minder te beïnvloeden zijn tegen in de schouder juist heel veel. Het is derhalve noodzakelijk dat de stemmer voor elke partiaal kan beschikken over een *stemgrafiek* waarin hij kan aflezen met hoeveel cents de desbetreffende toon zal dalen wanneer in een bepaalde sector over de gehele omtrek de wand met een zekere waarde verdund wordt. De praktijk heeft overigens geleerd dat wanneer een ervaren klokkenstemmer kennis van relatieve waarden heeft dit voldoende is, dat men derhalve slechts dient te weten in welke mate een boventoon ten opzichte van de andere bij een plaatselijke verdunning zal veranderen. In deze verhandeling zullen wij echter met absolute waarden werken. Die stemgrafieken zijn in figuren 29 - 33 verenigd.

In figuur 28 ziet men een klokdoorsnede. Deze is in dit geval zowel aan de binnen- als de buitenzijde in 42 sectoren verdeeld, waarbij zij opgemerkt dat ook een ander aantal toegestaan is. De nummering der sectoren is vanzelfsprekend voor beide kanten hetzelfde. Men vindt die ook in de stemgrafieken terug. Elke stemgrafiek geeft het aantal cents dat een parti-

aal zal dalen of stijgen indien de klokkenwand van de desbetreffende sector met 1 mm verdund wordt en wel voor een a^1-klok met een doorsnede van 925 mm en een gewicht van 451 kg. Wanneer wij ons vooralsnog tot die van de grondtoon beperken, dan zien wij dat wanneer in de sectoren 1 t.m. 3 metaal wordt weggenomen, de grondtoon zal stijgen. Van de 4 t.m. 26 zal hij dalen, terwijl na sector 26 de grondtoon op wandverdunningen niet meer reageert. Bij dit alles moet vanzelfsprekend opgemerkt worden dat de mate van verandering voor elke sector weer anders is. In 8-12 bijvoorbeeld daalt de grondtoon het meest, in 20-26 nauwelijks.



Figuur 34: Stembank voor grote klokken.

De stemgrafiek van de priem toont enerzijds enkele overeenkomsten met die van de grondtoon, anderzijds echter opvallende afwijkingen. De meest in het oog lopende is wel de zeer sterke daling van de priem wanneer de klok in de sectoren hoger dan 24 verdund wordt. En zo heeft iedere partiaal zijn eigen bijzonderheden. De kwint bijvoorbeeld kan op geen enkele plaats in de klok in toon verhoogd worden. De overige partialen zijn aan de lip in sectoren 1 en 2 allemaal omhoog te stemmen. Maar of dit verstandig is, zal later aan de orde komen.

Allengs zal het gebruik van de grafieken duidelijk zijn geworden. Stel men heeft een a^1-klok waarvan alleen de priem te hoog is. Verdunnen in de regio van sector 30 bijvoorbeeld biedt dan uitkomst. In sectoren rondom 10 zou aanzienlijk minder gunstige resultaten opleveren omdat in dat geval ook de andere partialen zullen dalen. Anderzijds kan men de sectoren 15 t.m. 22 benutten indien de priem over een interval omhoog gebracht moet worden dat de helft is van het interval waarover de grondtoon moet dalen. Overigens moet ook dan weer gelet worden op het gedrag van de andere partialen. Het stemmen is derhalve een spel van geven en nemen. Voordat wij echter met enkele voorbeelden dit zullen illustreren, wordt in figuur 34 de werkopstelling voor het verdunnen van de wand van grote klokken gegeven. Klokken tot een gewicht van circa 40 kg worden op een gewone draaibank uitgedraaid.

A is een ijzeren schijf, een zogenaamde klauwplaat, die in het horizontale vlak door middel van motoraandrijving kan ronddraaien (carrouselbank). De klok is hierop met behulp van klauwen B vastgezet. De klok draait dus met klauwplaat A rond. Anderzijds beschikt de stemmer over een ijzeren baar C waarin een beitel D is geklemd. Baar C is in houder E ge-

klemd. Deze kan door de stemmer zowel omhoog en omlaag als naar rechts en naar links gebracht worden. Beitel D kan derhalve elke positie tegen de klokkenwand gegeven worden. Draait vervolgens de klok rond, dan zal de beitel op de ingestelde plaats het brons over de gewenste dikte wegnemen.

sectoren	**dikte (mm)**	**bes**	**bes^1**	**des^2**	**f^2**	**bes^2**
beginopname (cents)		110	109	112	103	104
5 – 32	2,0	47	63	63	27	62
5 -8	3,5	19	45	18	18	11
8 – 12	1,5	-1	32	5	6	1
31 – 32	3,0	-1	22	4	3	1
28 – 32	2,5	-1	-1	1	-4	0

In bovenstaande tabel is een normaal voorbeeld van het stemproces gegeven. Het gaat hier om een bes^1-klok met een grootste doorsnede van 873 mm en een ongestemd gewicht van 424 kg. In de eerste regel zijn de belangrijkste vijf partialen genoteerd. In de tweede de cents-afwijkingen zoals de klok die had nadat ze uit de gietvorm was gehaald. Gevraagd werd deze klok tot een normaal bes^1 te stemmen.

Wat vooral zal opvallen is het feit dat de klok niet in één keer tot de juiste toonhoogte werd gebracht. Hiermee wordt voorkomen dat wanneer in één keer gestemd zou worden en de keuze der stemsneeën verkeerd zou zijn, de klok verloren zou zijn. Het is meer een kwestie van telkens opnieuw de volgende stap vaststellen. Ook hier dus weer een iteratief proces. Wel werd direct al duidelijk dat de klok zoveel te hoog van toon was, dat zonder bezwaar de gehele binnenzijde afgedraaid mocht worden, zij het natuurlijk met uitzondering van de sectoren 1-3 waar de meeste partialen juist stijgen. Ook sector 4 werd buiten beschouwing gelaten. Nadat de gehele klok 2 mm dunner was gemaakt, werd steeds voorzichtiger te werk gegaan. Opvallend is daarbij dat de priem achterbleef. Dit is overigens niet bezwaarlijk omdat een te hoge priem zonder gevaar voor de andere partialen in de kop van de klok gestemd kan worden.

Het resultaat van de stemprocedure die met 8 kg gewichtsverlies gepaard ging, is in de laatste regel vermeld. Men ziet daarin dat de kleine terts 1 cent te hoog is en de kwint 4 cents te laag. Een dergelijke nauwkeurigheid is overigens voortreffelijk. Het gehoor neemt namelijk met afwijkingen van enkele cents zonder meer genoegen. Waar ligt echter de grens? Welke afwijkingen mogen bij de individuele klok beslist niet overschreden worden? Het zal duidelijk zijn dat die grens voor de octaaf-partialen eerder bereikt zal zijn dan voor de partialen terts, kwint en de tonen boven het octaaf. In de praktijk zijn dan ook de volgende regels ontstaan waarbij wij uitdrukkelijk opmerken dat die ontleend zijn aan eisen die aan muziekinstrumenten met harmonische boventonen worden gesteld. Wij komen daar nog op terug. Bedoelde regels luiden als volgt.

1. De intervallen tussen de grondtoon, priem en octaaf mogen onderling niet meer dan vijf cents afwijken. Is de grondtoon bijvoorbeeld vijf cents te laag, dan mogen priem en octaaf uitsluitend naar beneden afwijken. Is de grondtoon bijvoorbeeld twee cents te hoog, dan mogen de priem en het octaaf niet meer dan drie cents beneden en zeven cents boven hun juiste

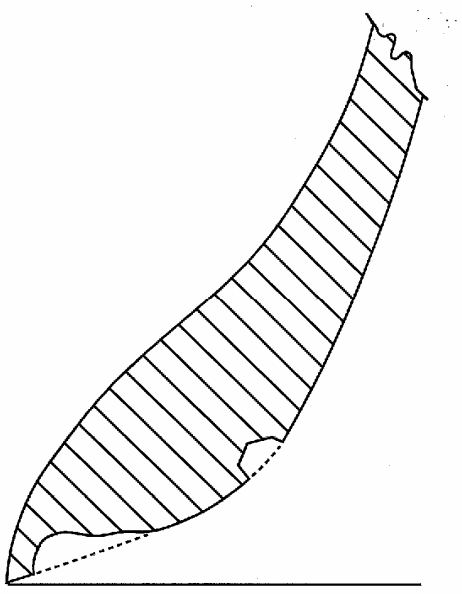
waarde liggen. Hierbij is het vanzelfsprekend niet noodzakelijk dat de priem en het octaaf een correct octaafinterval vormen. Ook dat interval mag met vijf cents te klein of te groot zijn.

2. Voor de intervallen die de partialen terts, kwint en duodeciem met de octaaftonen vormen, geldt in het algemeen dat deze niet meer dan vijftien cents mogen afwijken. Grotere afwijkingen doen niet alleen een redelijke zuiverheid geweld aan, doch ook de juiste profielvormen waardoor het timbre van de klok benadeeld kan worden. Met name geldt dit in het bijzonder voor een veel te lage kwint.

3. Voor de intervallen tenslotte die de overige partialen met de octaaftonen vormen geldt de regel dat niet in de eerste plaats de intervallen beslissend zijn voor een juiste stemming, maar of hun ligging in het klankspectrum tot hinderlijke zwevingen met andere aanleiding kan geven. Belangrijk is zodoende niet of de eerste undeciem een zuivere kwart vormt met het octaaf, maar wel of deze partiaal voldoende ver van de grote deciem en de tweede undeciem verwijderd is om storende zwevingen te vermijden.

Dit alles, het zij uitdrukkelijk herhaald, geldt uitsluitend voor de individuele klok, de enkele luidklok of slagklok bijvoorbeeld. Zodra echter die klok met andere moet samenklinken, zoals in een gelui of beiaard, gelden meer verfijnde regels. In zulke situaties kunnen aanzienlijk kleinere afwijkingen reeds als onaangenaam worden ervaren. In 6.3 (luidklokken) en 7.3 (speelklokken) zal dit nader besproken worden.

Eveneens zal nog aangetoond worden dat met name de kleine terts te hoog mag zijn, tot twintig cents. Dat heeft te maken met de heden ten dage gebruikte stemmingspatronen en de oude natuurlijke stemming.



Figuur 35: Onjuiste stemgroeven.

Natuurlijk kan men zich afvragen wat de hogere boventonen tijdens het stemmen doen. Ervaring leert dat deze in het algemeen hun oorspronkelijke relatie binnen de groep waartoe ze behoren, zullen behouden. zij het met uitzondering van de partialen die in de omtrek in vieren trillen (I-2, II-2, III-2, IV-2 enz.). Dit alles betekent bijvoorbeeld dat wanneer de gegoten klok een juiste duodeciem ten opzichte van het octaaf bezit, dat interval in de normaal gestemde klok gehandhaafd blijft. Afwijkingen zullen pas optreden wanneer tijdens het stemmen de klok plaatselijk wordt aangetast, bijvoorbeeld door het draaien van een diepe ril in de slagring (fig. 35). Bovendien leidt een wezenlijke aantasting van de profielvormen meestal tot nadelige effecten op de klankkleur.
Om bovenstaande redenen is ook het omhoogstemmen van een klok een gevaarlijke procedure. De mogelijkheden zijn namelijk te gering. De stemmer moet zich beperken tot de sectoren 1-3. Wil hij daarom enig effect sorteren, dan zal hij op die plaats een niet onaanzienlijke hoeveelheid brons moeten wegnemen. Wil men dit te vermijden dan betekent dit dat de grondtoon niet meer dan tien cents omhooggestemd mag worden. Wordt het meer, dan krijgt

men aan de lip een vervorming zoals die in figuur 35 is getekend. Aan de lip zelf immers is de grondtoon niet omhoog te stemmen; terts en octaaf daarentegen wel, reden waarom bij een te lage grondtoon aldaar niet gedraaid mag worden. Iets gunstiger ligt natuurlijk het geval wanneer vooral het octaaf, en eventueel de kleine terts. te laag zijn. Zoals de stemgrafieken aantonen, zijn de mogelijkheden dan iets groter, tot maximaal twintig cents.

Uit het bovenstaande blijkt wel hoe belangrijk het is dat de klok na het gieten voldoende hoog van toon is, zowel in haar totaliteit als voor elke partiaal afzonderlijk. Minstens even belangrijk is een redelijk juiste ligging van de hogere boventonen ten opzichte van de lagere. Want niet alleen is de structuur der intervallen binnen eenzelfde groep tonen bijzonder hecht zodat er in dat opzicht weinig te stemmen valt, doch bovendien heeft de stemmer zijn handen vol om met vijf verschillende stemgrafieken zo te manoeuvreren dat het gewenste resultaat verkregen wordt. Overigens is daar in de jaren negentig van de vorige eeuw drastisch verandering in gekomen. Wat is namelijk het geval?

Tot nog toe gingen wij ervan uit dat de klokkenstemmer aan de hand van de stemgrafieken bepaalt wáár in de klok en hoeveel brons uitgedraaid moet worden. Maar men kan dit ook een computer laten uitzoeken, een methode die de auteur in 1995 ontwikkelde. Met behulp van de wiskundige techniek van lineaire optimalisatie zoekt het desbetreffende programma naar de beste stemsneeën. In principe is een iteratief proces dan niet meer nodig. Immers, de computer kan de noodzakelijke stemsneeën exact aangegeven. De laatste stap ligt dan bovendien voor de hand. Immers, het stemmen kan aldus geheel geautomatiseerd worden op een computer gestuurde draaibank (CNC bank). Meerdere klokkengieters werken intussen in die richting.

Een laatste vraag tenslotte. In hoeverre zijn stemgrafieken onafhankelijk van het profiel? Zijn deze grafieken universeel? Beperken wij ons tot de gebruikelijke klokkentypen die elkaar slechts weinig ontlopen, dan kan hier een bevestigend antwoord op gegeven worden. Dit betekent niet alleen dat klokken met duidelijk afwijkende profielen (iets) andere stemgrafieken hebben, maar ook klokken met een relatief dikkere of dunnere wand. De gevoeligheid voor een dikteverandering neemt namelijk af naarmate de wand relatief dikker wordt.

Het zal duidelijk zijn dat de stemgrafieken ook bij het ontwerpen van de klok gebruikt kunnen worden. Vanzelfsprekend behoeft men zich dan niet te beperken tot die van de binnenzijde van de klok. Soortgelijke functies voor de buitenzijde kunnen bij het vaststellen van het klokmodel even waardevolle diensten verlenen. Bovendien kan men de grafieken bij het ontwerpen ook voor een plaatselijke verdikking gebruiken.

Tot slot komen wij nog even terug op onze beschouwingen over de gewenste nauwkeurigheid waarmee een klok gestemd moet worden, normen die ontleend werden aan de eisen voor instrumenten met harmonische boventonen, zoals het orgel bijvoorbeeld. Dat is overigens niet bezwaarlijk, maar beperkt wel de muzikale mogelijkheden van de klok. Het lijkt anderzijds zo vanzelfsprekend dat octaven zuiver dienen te zijn, dat derhalve grondtoon, priem en octaaf zuivere octaafintervallen met elkaar moeten vormen. Maar waarom? Die vraag wordt duidelijk wanneer wij twee orgelpijpen beluisteren, bijvoorbeeld c^1 en c^2. Wanneer deze gelijktijdig klinken, zal de eerste boventoon c^2 van de laagste pijp moeten samenvallen met de grondtoon c^2 van de hoogste pijp. Zo niet, dan zullen zwevingen gehoord worden. Maar grondtoon en priem, beide zonder boventonen, kunnen nooit met elkaar zweven. Hetzelfde geldt voor priem en octaaf. Het is ook hier dat wij het begrip *kritieke band* uit de

psycho-akoestiek introduceren.

Stel met heeft twee enkelvoudige tonen, dus tonen zonder boventonen. Wanneer ze samenvallen hoort men een volmaakt unisoon. Maar geleidelijk aan wordt een van beide verhoogd. Men hoort dan eerst langzame zwevingen, vervolgens snelle die daarna overgaan in een dissonante klank, of beter gezegd een ruige klank. Op een bepaald interval is die ruigheid maximaal om vervolgens geleidelijk aan weer af te nemen totdat een volmaakte consonantie is bereikt. Gewoonlijk is dat bij een interval groter dan een kleine terts. Het gebied van unisoon tot een volmaakte consonantie noemt men de kritieke band. Daarbuiten kunnen twee enkelvoudige tonen niet meer dissoneren. Dragen wij dit over op een klok dan moet men vaststellen dat zolang de boventonen op een kleine terts of meer van elkaar liggen, van een dissonantie geen sprake kan zijn. Vandaar ook dat luidklokken met bijvoorbeeld een te lage priem niet als dissonant worden ervaren, maar hoogstens als afwijkend. En vandaar ook dat talloze historische luidklokken die niet aan het strenge harmonische ideaal voldoen toch mooi zijn.

4.9 Zwevingen in de klokkenklank

Indien men een stemvork volgens de oude standaard (a^1 = 435 Hz) laat samenklinken met een volgens de nieuwe (a^1 = 440 Hz), dan hoort men de resulterende klank zweven, dat wil zeggen in klanksterkte en frequentie op en neer gaan. Wanneer men vervolgens het aantal *zwevingen* telt, dan blijken dat er vijf per seconde te zijn. Kennelijk wordt de zwevingsfrequentie bepaald door de verschilfrequentie van de beide deelnemende tonen.

Wanneer het aantal zwevingen per seconde slechts weinig is, zal dit in het algemeen niet als onaangenaam ervaren worden. Men denke bijvoorbeeld aan het vibrato van een violist. Wordt de zwevingsfrequentie echter geleidelijk aan opgevoerd, dan wordt een punt bereikt waarop de zwevingen in hoge mate gaan storen. Dit punt van maximale ruigheid is echter afhankelijk van het toongebied waarin die zwevingen zich afspelen. Maar ze ligt in de orde van grootte van vijftig tot honderd cents. Op dergelijke intervallen zullen twee enkelvoudige tonen de maximale ruigheid laten horen. In feite ontmoeten wij hier nogmaals de kritieke band, zij het dat wij op deze plaats het accent verleggen. Want wordt het aantal zwevingen nog verder opgevoerd, dan zullen ze als zodanig niet meer gehoord worden en verschijnt daarvoor in de plaats de verschiltoon (4.5).

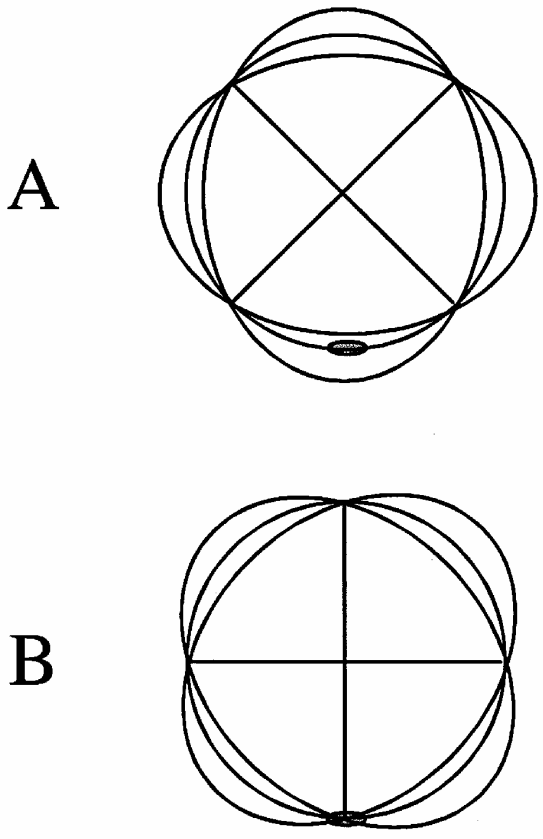
In de praktijk zullen klokken nooit dusdanig snelle zwevingen bezitten dat van maximale ruigheid sprake is. In de praktijk is het aantal zwevingen in een klok, zo die al te beluisteren zijn, aanzienlijk geringer. Nochtans bestaat er geen algemene kwaliteitsnorm. Sommigen vinden het geen enkel bezwaar wanneer een luidklok enkele zwevingen bezit, anderen juichen dat zelfs toe, ja vinden het van belang dat ook speelklokken wat zwevingen bezitten. Anderzijds zijn er musici die van elke klok eisen dat haar klank geen enkele zweving laat horen. De meningen zijn derhalve verdeeld, ofschoon degenen die bescheiden zwevingen acceptabel vinden in de meerheid zijn. Vast staat bovendien dat een zuiver gestemde en zwevingsvrije klok een volstrekt ondubbelzinnige toonhoogte bezit, terwijl een licht zwevende klok wat levendiger van klank is.

Bij een nadere bestudering van zwevingen in de klokkenklank blijkt al spoedig dat meerdere typen van elkaar onderscheiden kunnen worden. De meest voor de hand liggende zweving vindt zijn oorzaak in het feit dat enkele hogere partialen te dicht op elkaar liggen.

Met name gebeurt dit nog al eens met de beide undeciemen. Zoals reeds eerder (4.4 en 4.7) werd opgemerkt, is dit verschijnsel het beste in de bovenflank te bestuderen, terwijl men omgekeerd van dergelijk soort zwevingen bij een geschikt aanslagpunt weinig of niets zal merken. Tonen van de derde groep hebben immers een knoopparallel op de slagring.

Een ander type zwevingen vindt zijn oorzaak in inwendige onzuiverheid. Daarbij kan het volgende mechanisme in werking treden. Stel men heeft een klok met grondtoon c^1 (262,63 Hz) en priem c^2-4 cents (522,04 Hz). Wanneer een dergelijke klok voldoende hard en dichtbij wordt aangeslagen, zal zich in ons gehoororgaan onder andere een kunstmatige boventoon van de grondtoon vormen en wel precies op een octaafinterval. Deze heeft derhalve een frequentie van 2 x 261,63 = 523,26 Hz. Aldus is de voorwaarde voor het ontstaan van een zweving gevormd: twee tonen die dicht bij elkaar liggen. De zweving zal daarbij een frequentie bezitten van 523,26 - 522,04 =1,22 Hz. Daar de onderhavige boventoon van de grondtoon een fysiologische verschijnsel is, zal dit type zwevingen uitsluitend ontstaan wanneer er sterke partialen bij betrokken zijn, en met name grondtoon, priem en octaaf terwijl de kleine terts door zijn meer gecompliceerde harmonische verhouding niet in aanmerking komt. Bovendien moet de klok voldoende hard worden aangeslagen, terwijl tenslotte men op korte afstand moet luisteren. Al met al zijn deze zwevingen daarom van weinig belang en geheel ondergeschikt aan het hierna te behandelen soort.

Het is zeker geen zeldzaamheid dat de gegoten klok niet geheel symmetrisch is. Een plaatselijke porositeit bijvoorbeeld kan het evenwicht in de omtrek verstoren. Maar evenzeer natuurlijk het tegengestelde, een toevallige verdikking dus. In figuur 36 is het laatste geschetst. De ronde geschematiseerde doorsnede met verdikking geeft de niet klinkende klok. Wordt ze op een willekeurige plaats in de omtrek aangeslagen dan maakt de verdikking het onmogelijk dat zich aldaar een buik vormt. Als gevolg namelijk van die verstoring van het evenwicht zullen alle tonen zich in twee componenten splitsen. Eén component trilt alsof de verdikking niet bestond, dat wil zeggen hij legt een van zijn knopen in die verdikking. In figuur 36 is deze aangeduid met B voor een van de uiterste standen van een partiaal die in vieren trilt. De andere component daarentegen doet juist het tegenovergestelde, dat wil zeggen accepteert de verdikking volledig en legt een van zijn buiken in die verdikking. Het is trillingsfiguur A. Hiermee wordt het tevens duidelijk dat in het onderhavige geval niet het aanslagpunt de positie van de buiken in de omtrek bepaalt, doch



Figuur 36: A is hoger van toon dan B.

de a-symmetrie. Voorts zal het plausibel zijn dat de component die de verdikking in een van de buiken heeft, dus een klok met dikkere wand als trillingsobject heeft, een hogere frequentie, c.q. toon heeft. De component daarentegen die de verdikking vermeed, dus een klok met schijnbaar dunnere wand, een lagere frequentie c.q. toon zal geven. Het verschil in frequentie bepaalt vanzelfsprekend weer de zwevingsfrequentie.

In het voorafgaande spraken wij over een locale verstoring van de symmetrie. Het is deze die verantwoordelijk is voor zwevingen en niet wanneer de horizontale binnendoorsnede niet concentrisch is met de buitendoorsnede. Velen menen dat ook dan zwevingen zullen optreden. Men kan echter gemakkelijk nagaan dat in dit geval geen twee componenten kunnen ontstaan, immers, er kan geen voorkeur van buiken en knopen voor bepaalde plaatsen in de omtrek aangewezen worden.

Het hier besproken soort zwevingen komt in bijzonder veel klokken voor. Haar karakter kan overigens op gemakkelijke wijze van het eerder beschreven typen onderscheiden worden. Op welke plaats in de omtrek men een onzuivere klok ook aanslaat, de zwevingen als gevolg van die onzuiverheden zullen steeds gehoord worden. Bij een zweving die door een plaatselijke a-symmetrie veroorzaakt worden, is dat echter anders. Onderzoekt men bijvoorbeeld een zwevende grondtoon en tast men de klokomtrek met een hamer af, dan zal men acht zwevingsvrije punten vinden. Figuur 36 maakt duidelijk waarom dat zo is. Op plaatsen waar de hoge component een buik bezit, heeft de lage component een knoop. Slaat men derhalve precies in de buik van de hoge component aan, dan zal de lage niet tot ontwikkeling kunnen komen. In vier punten wordt derhalve uitsluitend de hoge component gehoord en zijn zwevingen afwezig. Vanzelfsprekend geldt hetzelfde voor de buiken van de lage component, zij het dat die 45^0 verdraaid zijn.

Het bovenstaande geldt natuurlijk ook voor andere partialen, zij het met dien verstande dat bij de kleine terts en kwint twaalf zwevingsvrije punten in de omtrek te vinden zijn, voor het octaaf zestien enz. Overigens moet opgemerkt worden dat in de praktijk de zwevingen van de grondtoon het meest storend werken. De frequentie ligt doorgaans in de orde van grootte van enkele Hz. Natuurlijk kan men dit euvel vermijden door de klok in een van de zwevingsvrije punten aan te slaan. Maar dit impliceert allerminst dat zo'n punt identiek is met een zwevingsvrij punt van andere gesplitste partialen. Beter is daarom het kwaad in de wortel aan te tasten, dat wil zeggen de a-symmetrie compenseren. De werkwijze is daarbij als volgt.

Uitgangspunt is de hoge component van de betrokken partiaal zoveel te verlagen dat deze samenvalt met de lage component. Wanneer het om de grondtoon gaat, en doorgaans is dat het geval, spoort men allereerst de vier buiken van de hoge component op en vervolgens de vier buiken van de lage. Daarna wordt met een beitel in een of meer buiken van de hoge component, dus in de knopen van de lage, een verticale ril of groef aangebracht. Hierdoor daalt die hoge component, terwijl de lage ongewijzigd blijft. Is het verschil weinig, en gewoonlijk is dat zo, dan is een ril in één buik voldoende. Maar soms zijn er meer nodig. Uiteraard speelt de positie van de ril in verticale richting ook een rol. In feite hebben wij hier wederom te doen met stemgrafieken, ofschoon deze niet in alle opzichten identiek zijn aan wat wij zullen noemen ontzwevingsgrafieken. Nochtans, de beste plek om de grondtoon te *ontzweven* is met een verticale ril vlak onder de slagring.

Ook de andere partialen zouden ontzweefd kunnen worden. Maar in de praktijk komt het daar niet van. Voor de priem bijvoorbeeld zouden de rillen bij voorkeur aan de buitenkant van de klok aangebracht moeten worden. Maar dat is vanzelfsprekend ondenkbaar. Er is bovendien ook nog een andere belemmering. Het risico bestaat namelijk dat door het ontzweven van bijvoorbeeld de priem juist een ander gaat zweven, bijvoorbeeld de kleine terts. Kortom, aan het ontzweven zitten nog al wat haken en ogen. In de praktijk komt het er dan ook op neer dat eigenlijk alleen maar kleine beiaardklokken, vanaf bijvoorbeeld vijftig kilo, voor ontzweven van uitsluitend de grondtoon in aanmerking komen. Want voor die klokjes gelden door hun toonhoogte de bezwaren in mindere mate. Bij deze zijn de resultaten dikwijls voortreffelijk, waarbij wij opmerken dat men al naar gelang de wensen de klokken niet helemaal ontzweefd behoeven te worden. Men kan derhalve bewust een kleine zweving achterlaten.

4.10 Temperatuur en toonhoogte

Dat temperatuurwisselingen wel degelijk invloed hebben op de toonhoogte van een klok kan een eenvoudig experiment op vlotte wijze aantonen. In een koele ruimte heeft men zowel een klok als een stemvork geplaatst. De stemvork wordt ingesteld op de grondtoon. Vervolgens zet men de klok in de zon. Wanneer men na verloop van tijd de stemvork uit de koele ruimte haalt en die klok daarmee opneemt, blijkt de laatste in toon verlaagd te zijn. Men hoort namelijk zwevingen tussen de grondtoon en de stemvork.

Dat de toonhoogte van een klok door temperatuurverandering wijzigt, is bijzonder plausibel. Stijgt namelijk de temperatuur dan zal de klok in al haar afmetingen groter worden. De toon zal derhalve dalen. Onderzoekingen hebben aangetoond dat die toondaling voor alle partialen even groot is. De temperatuur heeft derhalve geen invloed op de inwendige zuiverheid. Uit metingen is verder gebleken dat bij 1^0 C temperatuurstijging de partialen 1/3 cents dalen. Dit is natuurlijk een uiterst kleine waarde. Wanneer wij bijvoorbeeld het temperatuurverschil tussen zomer en winter op 30^0 C stellen, zal de klok in de zomer 10 cents lager klinken dan in de winter. Erg veel belang behoeft men daar dus niet aan te hechten. Evenmin geldt dit voor een beiaard waarvan een deel der klokken in de felle zon hangt en een ander deel aan de schaduwzijde van de toren. Zeker, er zullen aldus lichte verstemmingen tussen de klokken onderling optreden, doch in het algemeen zal dit nauwelijks opgemerkt worden. Iets anders ligt dat bij het stemmen van een klok.

Tijdens het uitdraaien op de draaibank of carrouselbank zullen de sectoren waar gestemd wordt door wrijving in temperatuur stijgen. Daarom mogen de slotmetingen pas uitgevoerd worden wanneer de klok in alle delen de kamertemperatuur heeft teruggekregen. Zou men daar niet op wachten, dan zouden de partialen die in het in temperatuur verhoogde deel het gevoeligst voor wandverdunning zijn na afkoelen van de klok weer lichtelijk in toon stijgen. In de praktijk zal men dit verschijnsel vooral bij de priem ontmoeten die in de sectoren 25 t.m. 35 (fig.30) als enige partiaal zo stemgevoelig is.

Een laatste situatie tenslotte waarin de temperatuurgevoeligheid niet verwaarloosd mag worden, geldt de periode na het gieten. Nemen wij bijvoorbeeld het volgende hypothetische geval. Op het moment dat de kort daarvoor gegoten klok nog 80^0 C heet is, wordt ze uit de vorm gehaald en met behulp van koud water geforceerd afgekoeld. Natuurkundig betekent dit dat de klok geen tijd krijgt om zich in te stellen op het evenwicht dat voor kamertempera-

tuur (20^0) geldt. Het evenwicht van 80^0 wordt derhalve *bevroren*. Dit impliceert dat de klok 20 cents hoger klinkt dan ze eigenlijk zou moeten doen. Natuurlijk mag men hopen dat het juiste evenwicht zich na verloop van tijd alsnog zal instellen, hoewel dat geenszins zeker is. Maar als het gebeurt, kan het verklaren waarom een correct gestemde klok zonder direct aanwijsbare oorzaak na verloop van tijd licht ontstemd raakt. Om die reden verdient het aanbeveling de klok uit zichzelf te laten afkoelen.

4.11 De invloed van de klepel op de klank

Vrijwel iedereen heeft wel eens de ervaring opgedaan dat een klok die met een zeer lichte klepel aangeslagen wordt, niet alleen zachter maar bovendien totaal anders klinkt dan wanneer een zware klepel gebruikt wordt. Blijkbaar bestaat er een directe relatie tussen klepel en klankkleur. Maar er zijn meer van dit soort ervaringen. Wanneer men bijvoorbeeld met een hamer van redelijk gewicht een klok aanstaat dan is de snelheid waarmee die hamer de klok treft, beslissend voor de klankkleur. Slaat men namelijk langzaam, dan zal de klok warmer van toon zijn dan wanneer men met grote snelheid slaat.

Ofschoon bovenstaande ervaring enkel en alleen met het gehoor gedaan kan worden, evenals vele andere, zijn ook hier ook meetinstrumenten voor beschikbaar. De bekendste is de *klankanalysator*. Een microfoon vangt het geluid van de klinkende klok op en leidt dit naar een elektronisch instrument waarin die klank niet alleen in eigenfrequenties, dus boventonen, ontleed wordt, doch ook in de sterkte van elke boventoon. Aldus kan men voor het moment van aanslag en elk willekeurig moment daarna het klankspectrum van de klok vaststellen. Helaas is een systematisch onderzoek met controleerbare proefopzetten nog slechts globaal gedaan.

Die globale onderzoekingen als deze hebben aangetoond, dat deze en soortgelijke verschijnselen verklaard kunnen worden met behulp van de contacttijd tussen klepel/hamer en de klok. Ook dit kan men zelf met een eenvoudig experiment vaststellen. Laat men namelijk een hamer na de aanslag heel snel van de klok terugkomen, dan zal die klok veel helderder, veel rijker aan hoge boventonen zijn dan in het geval dat de klepel even tegen de klokkenwand blijft rusten. Blijkbaar werkt een langere contacttijd tussen klok en klepel remmend op de kleine, heftige bewegingen van de hogere boventonen. Deze zullen dus korter en vooral minder sterk klinken. Omgekeerd kan men zich voorstellen dat de klepel als het ware meegaat met de veel langzamere bewegingen van de klokkenwand voor de lagere partialen. Opgemerkt zij nog dat in de praktijk de contacttijd in de orde van grootte ligt tussen 1/1000 en 5/1000 seconde, dus 1-5 ms.

Men kan zich gemakkelijk voorstellen dat bij toenemend klepelgewicht de contacttijd groter zal worden. Dit impliceert dat bij stijgend klepelgewicht de boventonen zowel in sterkte als in duur teruggedrongen zullen worden. De klok zal warmer klinken. Op grond hiervan lijkt het voor de hand te liggen om dat gewicht zo hoog mogelijk op te voeren. Er zijn echter duidelijke grenzen. In de eerste plaats moet namelijk vastgesteld worden dat een warm klinkende klok zonder hoorbare hoge tonen nauwelijks gewaardeerd zal worden. Maar ook het gebruik stelt grenzen aan het klepelgewicht. De klepel immers moet met zijn mechanische tractuur hanteerbaar blijven. Aldus is een algemeen aanvaard gemiddelde ontstaan dat neerkomt op 4% van het klokgewicht, waarbij kleine afwijkingen naar beneden eerder voorkomen

dan naar boven. In die afwijkingen spelen natuurlijk persoonlijke inzichten ten aanzien van het timbre een overwegende rol. Een uitzondering op deze regel vormen de klepels van kleinere speelklokken die naar verhouding veel zwaarder zijn. Bij de kleinste kunnen die wel oplopen tot 8% van het klokgewicht. In 10.1 zal daar nader op in worden gegaan.

Ook de snelheid van de klepel heeft directe invloed op de contacttijd. Hoe sneller namelijk de klepel, hoe vlugger hij wordt teruggekaatst. Een harde, dit is snelle aanslag staat dan ook gelijk met een felle aanslag. dat wil zeggen het effect is een klank die rijk is aan boventonen.

Tenslotte nog het materiaal waaruit de klepel gemaakt wordt. Ook hier kunnen extreme situaties het inzicht verdiepen. Wanneer men bijvoorbeeld de klok met een loden klepel zou aanslaan, is het evident dat nauwelijks nog boventonén gehoord worden. Maar een loden klepel kleeft dan ook als het ware tegen de klokkenwand. In de praktijk vindt dit soort klepels natuurlijk nauwelijks toepassing. Gangbaar zijn namelijk drie soorten materialen: smeedijzer, gietijzer en mangaanmessing. Opgemerkt zij dat mangaanmessing een alliage is dat in hoofdzaak bestaat uit 40% zink, 1% mangaan, 1% tin, minder dan ½% aluminium en de rest koper.

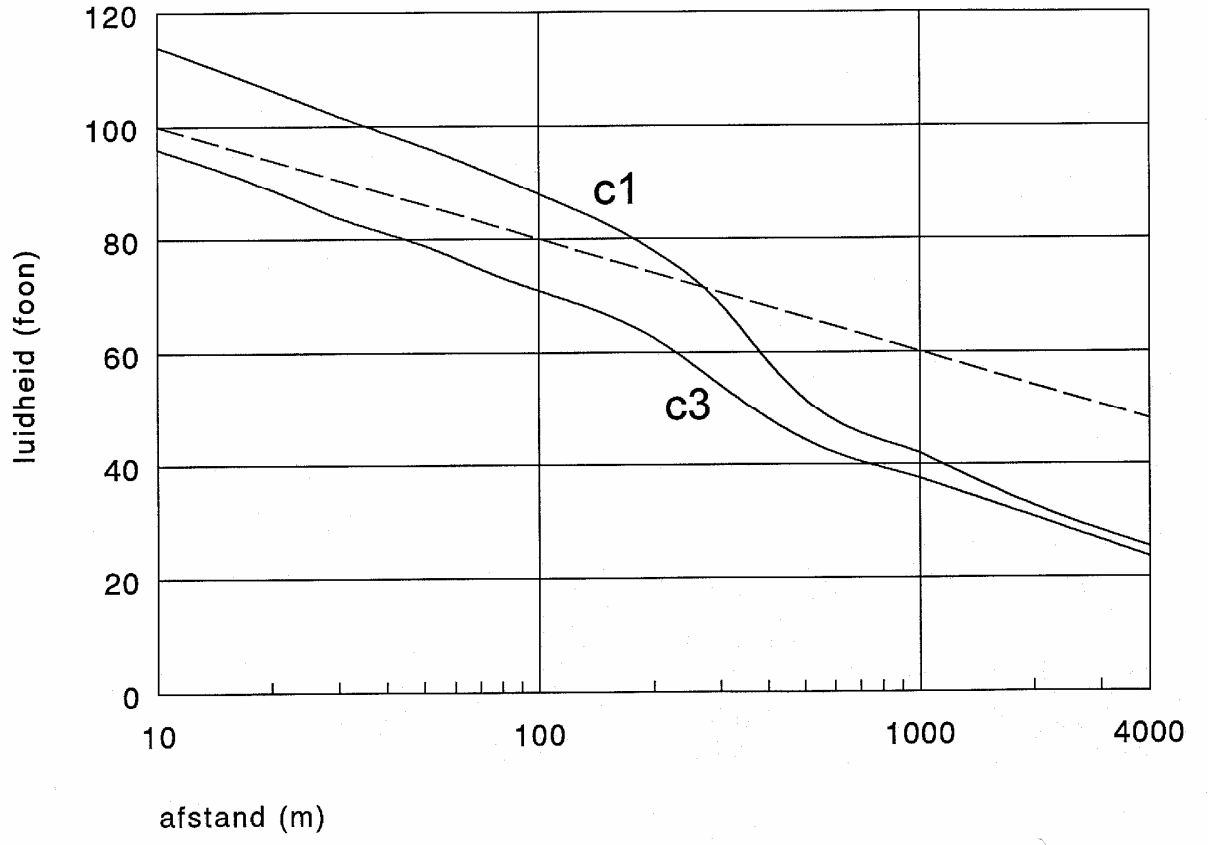
De hardheid van deze materialen wordt uitgedrukt in de schaal van Brinell, aangeduid als H_b. Goed smeedijzer heeft een hardheid van $H_b = 105$ kg/mm^2, gietijzer ligt tussen $H_b = 120 – 200$ kg/mm^2 en mangaanmessing $H_b = 120$ kg/mm^2. Deze hardheden ontlopen elkaar dus niet veel, althans indien wij ons beperken tot de lage waarden van gietijzer. In de praktijk komt het er dan ook op neer dat een hardheid van $H_b = 110$ kg/mm^2 verlangd wordt.

Blijft tenslotte de vraag in hoeverre de vorm van de klepel op de klank van invloed is. In dit verband speelt niet alleen het contactoppervlak van de klepel een cruciale rol, maar ook de uitharding van de klepel in de loop der tijd. Naarmate dat contactoppervlak groter wordt, zal ook de contacttijd toenemen. Toch zullen hogere boventonen meer gaan overheersen. Ongetwijfeld zal dat te maken hebben met het feit dat het slagoppervlak na veelvuldig gebruik van de klepel harder is geworden. Omgekeerd mag men stellen dat nieuwe klepels een meer grondtoonrijke klank aan een klok geven dan oudere. Weliswaar is de contacttijd minder doch het ijzer of brons van de klepel is nog niet uitgehard. Natuurlijk dient men bij dit alles te beseffen dat het slijtageoppervlak van de klepel niet zó groot worden, dat allerlei storende neveneffecten kunnen optreden.

4.12 De hoorbaarheid van de klok

Een veel gestelde vraag is hoe ver een klok gehoord kan worden. Meestal wordt daarbij een directe relatie gelegd tussen hoorbaarheid en klokgewicht. In zekere zin is dat ook zo. Globaal mag men immers stellen dat de geluidsintensiteit recht evenredig is met het gewicht aan brons. Een klok die twee maal zo zwaar is, zal derhalve een klank geven waarvan de intensiteit eveneens twee maal zo groot is. Het menselijk gehoor ervaart dit echter op geheel andere wijze: het reageert namelijk logaritmisch. In meer eenvoudige termen vertaald betekent dit dat bij een verdubbeling van de geluidsintensiteit het geluidsniveau met 3 dB (decibel) toeneemt. Teneinde zich in deze grootheid te kunnen oriënteren zij opgemerkt, dat een orkest op volle sterkte 80 dB produceert, een zacht spelende radio nog altijd 40 dB, terwijl het geritsel van bladeren met 10 dB gehonoreerd moet worden. Voortgaande zou men kunnen stellen dat de gehoordrempel blijkbaar bij 0 dB ligt. Toch is dat niet correct gesteld. De ge-

hoordrempel is namelijk mede afhankelijk van de gehoorgevoeligheid, een grootheid die bij elke frequentie weer anders is. Zeer lage tonen zijn bij 50 dB bijvoorbeeld al niet meer te horen, terwijl dit bij hoge tonen iets gunstiger ligt. Opdat die gehoorgevoeligheid niet telkenmale in de beschouwingen betrokken behoeft te worden, is het fysiologisch begrip foon ingevoerd als equivalent van het zuiver natuurkundig begrip decibel. In de foonschaal is derhalve nul de gehoordrempel terwijl de pijngrens, het moment waarop de klank ondraaglijk wordt, in de buurt van 130 foon ligt. Opgemerkt moet worden dat heden ten dage de foon weinig gebruikt wordt en vervangen is door dB(A). Maar de foon is wat inzichtelijker.

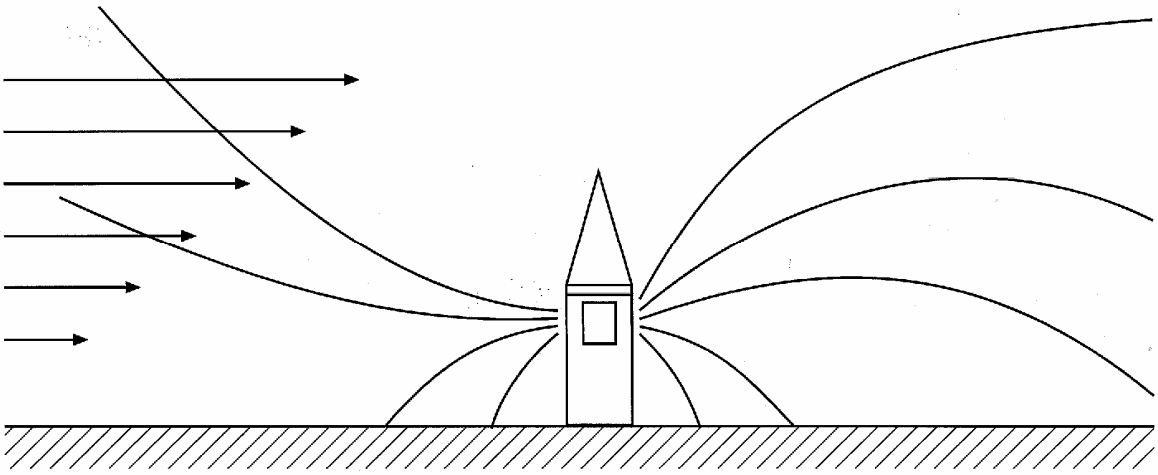


Figuur 37: De hoorbaarheid van een klok. De streeplijn is de theoretische voor alle frequenties.

Figuur 37 die de hoorbaarheid van de klok op verschillende afstanden geeft, is gebaseerd op de foonschaal. Ze geeft in schematische vorm de metingen die gedaan werden aan klokken in het vrije veld bij windstil weer. Op de horizontale as is de luisterafstand in meters genoteerd, op de verticale as het aantal foons dat ter plaatse waargenomen werd. Zoals men ziet, is de hoorbaarheid als een bundel geschetst. De bovenste begrenzing geldt voor een klok met slagtoon c^1 (gewicht ca.2300 kg), de onderste voor een c^3-klok (gewicht ca.40 kg). Men leest gemakkelijk af dat de c^1 op 100 meter nog op 88 foon wordt waargenomen tegen de c^3 op 72 foon. Een zeer groot verschil is dat dus niet. Nog minder wordt dat, ja verdwijnt eigenlijk op afstanden van 400 meter en meer. De geringe gehoorgevoeligheid voor lage en zwakke tonen is hier debet aan. Dit betekent dan ook dat het weinig zin heeft om zeer zware klokken aan te schaffen, uitsluitend omwille van de hoorbaarheid op grotere afstanden.

Uit figuur 37 kan men voorts afleiden op welke afstand de klok werkelijk onhoorbaar

is geworden. Het ligt in de orde van grootte van vijf km. In de praktijk wordt dat lang niet altijd gehaald. Het maakt immers nogal een verschil of men een klok hoort in het geroezemoes van een dorp of stad, dan wel bij windstil weer op een even stille als vlakke weide. De praktijk kan de grens van hoorbaarheid dan ook drastisch terugschuiven tot een à twee km. Wel zou men een verfijning kunnen aanbrengen tussen een luidklok en een beiaard.



Figuur 38: Windrichting en hoorbaarheid.

Geldt genoemde grens namelijk voor een luidklok, bij een beiaard moet de verstaanbaarheid van de gespeelde melodieën voorop staan. Op die wijze schuift de grens nog verder terug, tot maximaal een km. Natuurlijk zou men kunnen opmerken dat de hoeveelheid geluid van een beiaard, bestaande uit zovele klokken, aanzienlijk meer moet zijn dan van een enkele luidklok. De luisteraar ervaart het meestal omgekeerd. In de eerste plaats namelijk, en vrij wezen er reeds op, geeft een verdubbeling van het geluidsniveau slechts 3 dB meer geluid. In de tweede plaats wordt een luidklok aanzienlijk harder aangeslagen dan een speelklok, terwijl in de laatste plaats niet vergeten moet worden dat nooit alle klokken van een beiaard gelijktijdig klinken. Niettemin is figuur 37 strikt genomen alleen maar voor luidklokken van kracht.

Maar het is natuurlijk niet alleen het omgevingslawaai dat op de hoorbaarheid invloed uitoefent. Ook hoge gebouwen, zoals flats, kunnen een storende rol spelen. Daarbij geldt overigens de regel dat naarmate de toon van de klok lager is, de obstakels minder belemmerend werken. Of anders geformuleerd, wil men een klein klokje kunnen horen dan mag er zich tussen dat klokje en de luisteraar niets bevinden, of hooguit voorwerpen van kleine omvang. Men moet derhalve het klokje als het ware kunnen zien. Op dit aspect en ook de invloed van de toren op de hoorbaarheid komen wij in hoofdstuk 11 nader terug.

Tot nog toe werd steeds gesproken over windstil weer. Hoe is echter de situatie wanneer er een flinke wind staat? Uit ervaring weet men dat geluid met de wind mee aanzienlijk beter te horen is dan in omgekeerde richting. In figuur 38 is dat enigszins verduidelijkt. Het misverstand heerst namelijk dat die betere hoorbaarheid zijn grond zou vinden in het feit dat bij gunstige wind meer geluid dan normaal meegevoerd zou worden. Dit is echter onjuist. De oorzaak moet namelijk gezocht worden in de omstandigheid dat de windsnelheid bij stijgende

hoogte toeneemt.

In figuur 38 is dat met enkele horizontale pijlen schematisch weergegeven. Het gevolg hiervan is dat geluid wat tegen de windrichting in klinkt, dus links van de toren, omhoog gebogen wordt, terwijl rechts van de toren het geluid uiteindelijk naar de grond toegebogen wordt. Dit verklaart waarom een klok met de wind mee aanzienlijk verder gehoord kan worden. Om de gedachten te bepalen, wordt een klok bij windstil weer op één km afstand nog gemakkelijk gehoord, bij sterke wind kan dit minstens enkele km verder zijn. Natuurlijk moet rekening worden gehouden met het feit dat het geluid door de windstoten in flarden kan overkomen. Het kan aan een beiaard of luidklok een bijzondere bekoring geven.

4.13 Het klokkenbrons

In 3.6 is het klokkenbrons al even ter sprake geweest. De gebruikelijke samenstelling is ongeveer 79% koper, 19% tin en 2% andere metalen zoals lood, zink, ijzer enz. De ervaring heeft geleerd dat hiermee de mooist klinkende klokken gegoten kunnen worden. Uitdrukkelijk spreken wij hier over *klinken*. De toonzuiverheid van een klok, de juiste verhouding tussen de partialen derhalve, wordt in geen enkel opzicht door welk materiaal of welke legering dan ook beïnvloed. Het is dus in principe mogelijk een zuiver gestemde klok uit lood te maken. Maar of een dergelijke klok klinkt is natuurlijk een geheel andere vraag. Vermoedelijk zou men bij aanslaan niet meer dan een doffe slag horen. Hieruit volgt ook de functie van het klokkenbrons, namelijk te zorgen dat de klok klankrijk en helder is en bovendien voldoende lang naklinkt.

Gevoelsmatig weet men natuurlijk dat hoe harder een metaal of alliage is, hoe helderder het klinkt. Iets soortgelijks geldt voor klokkenbrons. In genoemde samenstelling is het namelijk opgebouwd uit relatief grote kristallen van grote hardheid die zijn opgesloten in een mengsel van kleinere harde en zachte kristallen. Wordt vervolgens het tingehalte opgevoerd dan stijgt het aantal harde kristallen en daalt het aantal zachte kristallen. Het klokkenbrons wordt dus harder. Hoe hoger het tingehalte, hoe klankrijker de klok derhalve. De grens ligt ongeveer bij 32% tin. Daarboven krijgt het brons een totaal andere kristalstructuur en is als klokkenbrons niet langer bruikbaar. Maar ook 32% is niet helemaal haalbaar; het zijn praktische overwegingen die een lagere limiet noodzakelijk maken. Brons met meer dan 25% tin wordt namelijk zó hard en zó bros dat een klok uit dit materiaal reeds na enkele slagen gescheurd zou zijn. Overigens impliceert dit allerminst dat daarom alle klokken met bijvoorbeeld 24% tin gegoten moeten worden. Want afgezien van het feit dat tin duurder dan koper is waardoor een zuinige toepassing voor de hand ligt, zou circa 24% tamelijk fel klinkende luidklokken opleveren. Om die reden beperkt men zich liever tot 19 – 21% tin. Speelklokken daarentegen krijgen naarmate ze kleiner en dus hoger van toon worden geleidelijk aan meer tin, tot 25%. Het is een van de manieren om dit soort klokjes een krachtige toon te geven zodat zij zich kunnen meten met de grotere speelklokken van een beiaard.

Er is ook een onderste grens waaronder het klokkenbrons zijn betekenis verliest. Deze ligt bij 16% tin, het gehalte waarbij alle harde kristallen uit de legering verdwijnen. Een klok gegoten van een brons met 10% tin zal dan ook nauwelijks klinken. Een van de kenmerken waaraan men dit kan constateren, is de uitklinktijd van de grondtoon en de boventonen. Bedraagt deze in seconden voor de grondtoon bij goede klokken minstens 0,6 maal de diameter

in cm, bij klokken met een te laag tingehalte kan dit tot de helft of nog minder teruglopen, terwijl de hogere partialen alleen nog maar tijdens de aanslag gehoord worden.

Intussen is een juist tingehalte alleen allerminst een garantie dat de klok werkelijk goed zal zijn. Ook bijmengingen spelen daarin een grote rol. Lood kan bij hoge concentraties, bijvoorbeeld meer dan 4%, een fatale rol spelen. Dit metaal wordt namelijk niet door de kristallen opgenomen, doch zal zich daartussen nestelen. Het gevolg is dat de trillingen van het klokkenbrons versneld afgeremd worden. De ervaring heeft overigens geleerd dat er omstandigheden zijn waarin een teveel aan lood minder ingrijpende gevolgen heeft. Een extra hoeveelheid tin bijvoorbeeld kan compenserend werken.

Lood is eigenlijk de voornaamste verontreiniging van klokkenbrons. Dit is ook wel te begrijpen daar loodvrij brons bijzonder duur is. Het compromis ligt bij circa 1-2%. De andere bijmengingen blijven samen doorgaans onder 2%. Het zijn in de eerste plaats zink en daarnaast ijzer, nikkel, antimoon, fosfor enz. Uit akoestisch oogpunt kan men bij kleine concentraties de regel hanteren dat het ijzer en nikkel bij het koper geteld moeten worden en zink, antimoon en fosfor bij het tin. Stel men heeft de volgende samenstelling: koper 78,0%, tin 19,5%, zink 0,5%, nikkel 0,4%, antimoon 0,3%, ijzer 0,1%, fosfor 0,1% en lood 1,1%. Een dergelijke legering reageert in akoestisch opzicht ongeveer hetzelfde als koper 78,5%, tin 20,4% en lood 1,1%. Hieruit zou men misschien de conclusie willen trekken dat zink en antimoon het veel duurdere tin kunnen vervangen. Experimenten in die richting zijn echter zonder duidelijk resultaat gebleven.

Heeft men een klok gegoten uit het goede klokkenbrons, dus met het juiste tingehalte en met bijmengingen die het voorgeschreven maximum niet overschrijden, kan men er dan van verzekerd zijn dat de klok ook inderdaad goed klinkt? Allerminst! De kwaliteit van het gietwerk speelt namelijk een even beslissende rol. Een euvel dat nog al eens voorkomt is bijvoorbeeld een klok die vooral in de hogere boventonen kort van toon is en daardoor elke glans mist. Meestal moet de oorzaak in een poreus gietsel gezocht worden en dus niet in inferieur klokkenbrons. De hechte structuur van het brons is als gevolg van die poreusheid immers doorbroken, waardoor per tijdseenheid meer trillingsenergie dan normaal in warmte wordt omgezet. Zodoende kan minder energie aan de lucht worden afgegeven, waardoor de klok zwakker en vooral korter zal klinken. Of anders geformuleerd: de *materiaaldemping* of *inwendige demping* is groter dan normaal geworden. Onderzoekingen wijzen uit dat de grootte van de poreusheid ook een rol speelt. Zijn bijvoorbeeld de diameters van de gasholletjes ongeveer één mm dan ligt die extra demping in de buurt van het dubbeloctaaf van een c^2-klok, dus bij c^4. Wordt de poreusheid echter grover van structuur dan zal de beginnende extra demping al bij lagere tonen merkbaar zijn. Omgekeerd kan men stellen dat, daar de overmatige demping alleen afhankelijk is van de doorsnede van de poreusheid, zeer zware klokken nauwelijks hinder zullen ondervinden en dat in tegenstelling met zeer kleine speelklokken die bij geringe poreusheid reeds kort van toon kunnen zijn. Daarom ook verdient het gieten van kleine speelklokken extra aandacht. Bij dit alles zal het natuurlijk duidelijk zijn dat slink en oxide-insluitingen tot hetzelfde euvel in de klok aanleiding kunnen geven (3.9).

Het goede klokkenbrons op de juiste wijze vergieten leidt derhalve tot een mooie klank. Onvermeld bleef evenwel dat ook andere goede eigenschappen van het klokkenbrons tot dit resultaat voeren. Zou men namelijk volgens eenzelfde model op dezelfde maat twee klokken gieten waarvan één uit klokkenbrons en de andere uit gietstaal, dan zou de laatste on-

geveer een kwint hoger klinken dan de eerste. Het betekent dat, hoewel brons of een andere legering geen bijdrage kan leveren tot de inwendige zuiverheid, het alliage mede aansprakelijk is voor de absolute toonhoogte. Formuleren wij ons voorbeeld anders, dan zou men kunnen stellen dat een stalen klok met dezelfde toonhoogte als een bronzen 1½ maal zo groot is. Een kwint immers komt overeen met een verhouding van 3:2. De stalen klok zal daarom met haar groter oppervlak ($1½^2 = 2,25$) tijdens het trillen meer last van de lucht ondervinden dan de bronzen en bovendien, zoals berekeningen aantonen, des te meer naarmate de partiaal een hogere frequentie bezit. De demping van de lucht, de *akoestische* of *uitwendige demping*, is bij stalen klokken derhalve groter dan bij bronzen. En dit betekent dan ook dat een stalen klok korter klinkt dan een bronzen en zulks dan ondanks het feit dat de *materiaaldemping* van staal juist geringer is dan die van brons. Daarom missen stalen klokken ten enenmale de sonoriteit van die uit klokkenbrons, tot groot verdriet van hen die steeds opnieuw pogen een goedkoop vervangingslegering voor het relatief dure klokkenbrons te vinden. Het illustreert eens te meer hoeveel gunstige eigenschappen in het brons verenigd zijn.

4.14 De klankkleur van de klok

Het mag misschien bevreemden dat de *klankkleur* of het *timbre* van een klok niet eerder dan op het einde van het deel over de individuele klok behandeld wordt. Toch heeft dat wel degelijk zijn reden. De klankkleur is namelijk van zoveel factoren afhankelijk dat eerst al die factoren aan de orde geweest moeten zijn alvorens een samenvattende beschouwing over het timbre te kunnen geven. Vooraf echter moet een definitie van het begrip klankkleur worden gegeven.

Onder klankkleur of timbre verstaan wij al die karakteristieke elementen in de klank waarmee de luisteraar een muziekinstrument weet te identificeren. Klankkleur is daarom een menselijke ervaring, hoezeer ook natuurkundige grootheden daaraan ten grondslag liggen. Dat zijn namelijk de onderlinge ligging van de partialen, hun sterkte tijdens de aanslag en het afnemen daarvan in de tijd (4.4). En tenslotte natuurlijk de betekenis van de slagtoon in de klankkleur van een klok (4.6).

Tot op heden is de rol van de slagtoon voor het timbre, en dan met name tijdens de aanslag, schromelijk onderschat. Wij wezen daar reeds eerder op. Immers, wanneer tijdens de aanslag geen slagtoon wordt gevormd, kunnen de hogere dissonante partialen onverkort gehoord worden en dat met alle kwalijke gevolgen voor de klankkleur. Onderzoekingen hebben aangetoond dat bij een afwijking in het kwint-interval tussen octaaf en duodeciem van vijftig cents of meer géén slagtoon wordt gevormd. Kleinere afwijkingen zullen de slagtoon weliswaar nog niet onderdrukken, doch een duidelijke hoorbaarheid niet bevorderen. Maar wenden wij ons thans tot de partialen.

Omdat in het volgende hoofdstuk niet-octaafklokken aan de orde komen, bespreken wij hier uitsluitend octaafklokken, beiaardklokken derhalve. Beperken wij ons even tot de intervallen tussen de voornaamste partialen dan is het vooral de kleine terts-partiaal welke de klankkleur van de klok ten opzichte van andere instrumenten bepaalt. Niet voor niets gebruiken meerdere componisten daarom een kleine terts om de klokkenklank te imiteren. Maar luisteren wij uitsluitend naar klokken dan is juist de kleine terts een gemeenschappelijke factor. De kleine terts-boventoon zal daarom nauwelijks aanleiding kunnen zijn tot onderlinge

klankkleurverschillen. Toch wordt die mening niet door iedereen gedeeld. Sommigen menen dat kleine verstenmmingen in de ligging van deze partiaal, bijvoorbeeld een licht verhoogde terts, wel degelijk van invloed op het timbre is. Het gaat dan om hooguit tien cents, een waarde die echter nauwelijks van betekenis is en zeker wanneer, zoals bij de klok, geen harmonische boventonen aanwezig zijn.

Zo er al verschillen door de ligging der boventonen zijn, moeten veeleer de hogere daarvoor aansprakelijk gesteld worden. Zowel in 4.4 als 4.7 is daar reeds aandacht aan besteed. Onder andere werd gesproken over de reeks grote deciem e^3 (II-3), eerste undeciem f^3- (III-2) en tweede undeciem f^3+ (III-3), een reeks die, wanneer ze ineengedrongen is, de klok onaangename zwevingen kan bezorgen. Een juiste keuze van het aanslagpunt kan hierin echter wel iets ten goede keren, hoewel de hoofdoorzaak in het gekozen profiel gezocht zal moeten worden.

Het voorbeeld gaat over een negatieve invloed op het timbre. Liggen de boventonen gunstiger dan zullen ze afzonderlijk nauwelijks nog opvallen. Eigenlijk betekent dit dat bij een goed ontworpen en juist gestemde klok van een bepaald type, bijvoorbeeld een octaafklok, de invloed van de onderlinge relatie der partialen op het timbre in feite steeds dezelfde is. De praktijk bevestigt dit voortdurend. Want afgezien van die geïsoleerde verschuivingen in het klankspectrum van de klok zijn het toch de sterkte en de uitklinktijd der partialen die beslissend zijn voor verschillen in klankkleur tussen klokken onderling. Daarin vindt men de meest opvallende varianten in timbre. Op dit aspect werd reeds uitvoerig ingegaan. Zo werd in 4.4 aangetoond hoe belangrijk het aanslagpunt van de klepel kan zijn. Hoe dichter de klepel namelijk de klok bij een knoopparallel van een bepaalde boventoon aanslaat, hoe zwakker die boventoon gehoord zal worden. Het is een facet dat vooral voor de tonen van het tweede en hogere type van belang is.

Verder werd in 4.11 de invloed van het klepelgewicht en het materiaal van de klepel op de sterkte der boventonen onderzocht. Hoe zwaarder en zachter, hoe sterker de lage partialen ten opzichte van de hogere zullen zijn. Omgekeerd, hoe lichter en hoe harder, hoe rijker aan boventonen de klank zal zijn. In 4.13 tenslotte werd de invloed van het klokkenbrons besproken, in het bijzonder de kwalijke gevolgen van een slecht gietsel. Daar ook bleek duidelijk dat de duur van uitklinken van elke boventoon uitsluitend bepaald wordt door de kwaliteit van het brons en het gietwerk. In theorie zou men weliswaar invloed kunnen uitoefenen door hard of zacht te slaan, doch dat blijven slechts procentuele verschillen. Ook hier geldt de stelling dat men de trillingsenergie weliswaar tot de helft kan verlagen, maar anderzijds dat dit door het gehoor wordt ervaren als een verlaging van het geluidsniveau met slechts 3 dB. De klok of de partiaal zal derhalve drie decibel eerder onhoorbaar worden.

Een laatste aspect is nog niet eerder ter sprake gekomen. Het moge immers duidelijk zijn dat in alle beschouwingen de gehoorgevoeligheid een grote rol speelt. En dat geldt dan zeker niet alleen voor het welbekende verschijnsel dat lage tonen als warm klinkend ervaren worden tegen de hogere helder, ja soms zelfs scherp. Een grootheid immers als de uitklinktijd wordt op het gehoor vastgesteld zodat men in eerste aanleg in gebieden waar dat gehoor het gevoeligst is de langste relatieve tijden zal noteren. Het kan tussen klokken uit het twee gestreept en vijf gestreept octaaf verschillen van 10% opleveren.

4.15 Niet-octaafklokken

De voorafgaande beschouwingen waren vrijwel uitsluitend gebaseerd op de octaafklok met als eerste vijf partialen c^1-c^2-es^2-g^2-c^3. Een enkele maal hebben wij opgemerkt dat ook andere toonstructuren mogelijk zijn, resulterend in *noon*-, *septiem*- en zelfs *sextklokken*. De vraag is natuurlijk of dergelijke typen serieus genomen mogen worden, dan wel beschouwd moeten worden als mislukte octaafklokken. Voor de laatste mogelijkheid pleit het feit dat wanneer men een groot aantal historische luidklokken onderzoekt, dus van elk denkbaar type, een duidelijke tendens te bespeuren valt naar het realiseren van de octaafklok. Blijkbaar hebben alle klokkengieters, bewust of onbewust, naar de octaafklok gezocht en wanneer ze daarin niet slaagden, was het afwijkende resultaat dus niet een bewuste keuze.

Benadert men het probleem van de andere kant dan blijken die zogenaamde mislukte octaafklokken toch een eigen charme te hebben. Want ze worden niet als vals ervaren doch als anders. Het is hier dat wederom de kritieke bandbreedte van zich laat horen. Want boventonen kunnen niet met elkaar dissoneren zolang ze op een grotere afstand dan een kleine terts van elkaar verwijderd zijn. Steeds weer moet dan ook gewezen worden op het feit dat wanneer twee orgelpijpen met elkaar dissoneren dit zijn oorsprong in strijdende boventonen vindt. Maar de partialen van een klok hebben geen boventonen, zij zijn dat zelf, zodat van dissonantie geen sprake kan zijn. In dat licht bezien is het niet verwonderlijk dat eigenlijk niemand bezwaar maakt tegen een klok waarvan de priem te laag is, een kenmerk dat in vele historische klokken is terug te vinden, dus c^1-b^1-es^2-g^2-c^3, waarbij de opmerking gemaakt moet worden dat de verlaagde priem natuurlijk zelden een exacte halve toon is. Doch laat ons deze kloktypen nauwkeuriger definiëren.

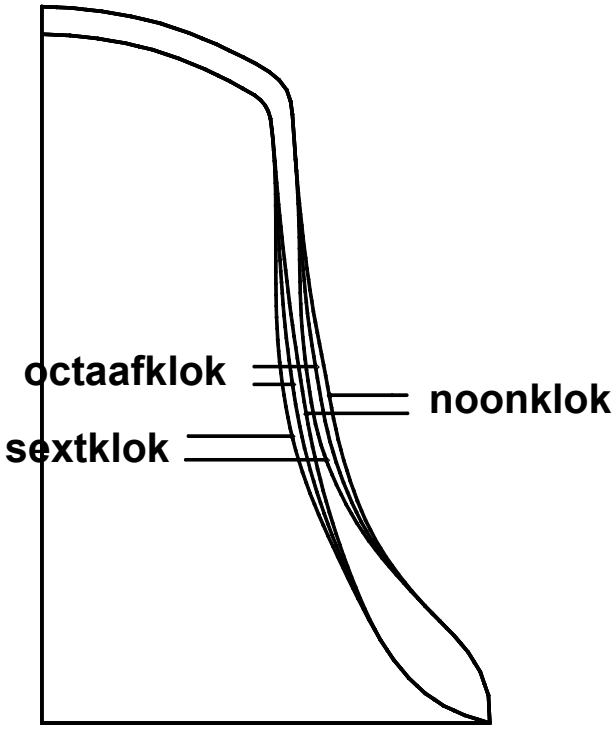
Niet-octaafklokken worden benoemd naar het interval dat de slagtoon met de grondtoon maakt en met een toevoeging over de ligging van de priem. Onderstaande tabel waarin het octaaf I-4 per definitie op c^3 is gesteld, dus de slagtoon op c^2, moge dit verduidelijken. Overigens gaat het hierbij om een keuze uit meerdere mogelijkheden.

naam van de klok	**I-2**	**II-2**	**I-3**	**II-3**	**I-4**
grote sextklok met dubbel verminderde priem	es^1	bes^1	es^2	f^2	c^3
grote septiemklok met verminderde priem	cis^1	b^1	es^2	fis^2	c^3
mineur octaafklok met reine priem	c^1	c^2	es^2	g^2	c^3
mineur octaafklok met verminderde priem	c^1	b^1	es^2	g^2	c^3
majeur octaafklok met reine priem	c^1	c^2	e^2	g^2	c^3
kleine noonklok met overmatige priem	b	cis^2	es^2	g^2	c^3
kleine noonklok met verminderde priem	b	b^1	es^2	fis^2	c^3

Overziet men deze lijst, dan is eigenlijk alleen maar de kleine noonklok met overmatige priem discutabel. Immers, in deze klok liggen de priem en terts binnen de kritieke bandbreedte en kunnen derhalve tot verstoring van een aangename klank leiden. Derhalve niet de verstoorde muzikale intervallen, doch wel de kans op overmatige zwevingen. Dat deze klokken bewust werden nagestreefd, kan zeker niet gezegd worden. Opvallend is bijvoorbeeld de wisselwerking tussen grondtoon en priem. Het blijkt namelijk dat wanneer de grondtoon aan de hoge kant is, de priem doorgaans te laag is en omgekeerd. En dat heeft alles te maken met een bepaald profielontwerp. Zodra namelijk het profiel conischer wordt gemaakt, dus de insnoering

boven de slagring minder geprononceerd, zal de grondtoon dalen en de priem stijgen. Er ontstaat derhalve een noon-klok met verhoogde priem. Omgekeerd zal een te hoge grondtoon en te lage priem, dus een septiem- of sextklok, hun oorsprong vinden in een meer ingesnoerd model. In figuur 39 zijn deze uiterste getekend, tezamen met de normale mineurklok.

Vastgesteld moet tenslotte worden dat in tegenstelling met Duitsland in Nederland met dit type klokken nauwelijks ervaring bestaat. In Nederland en ook in Vlaanderen heeft de octaafklok van de beiaard ook de luidklokkencultuur altijd gedomineerd. Immers, dat voor de beiaard alleen maar de octaafklok geaccepteerd kan worden, is natuurlijk duidelijk. Want, om slechts een simpel voorbeeld te geven, een klok die klinkt met slagtoon c^2 en uitklinkt met een grondtoon cis^1 kan in een melodie alleen maar verwarring stichten. En dan zwijgen wij nog maar van de zwevingen die zulke klokken onderling kunnen maken. Maar om deze redenering ook voor luidklokken van kracht te verklaren, is per se onjuist.



Met dit alles lijkt het daarom de moeite waard om in de toekomst wat meer gestructureerd de betekenis van niet-octaafklokken voor de luidklok te onderzoeken. Wij weten slechts dat een noon-klok een sterke, lang klinkende grondtoon heeft tegen de sextklok een wat ingehouden kale klank. Dat hier een relatie met het profiel bestaat, moge duidelijk zijn.

Figuur 39: De bewegende flank.

4.16 De grote terts-klok

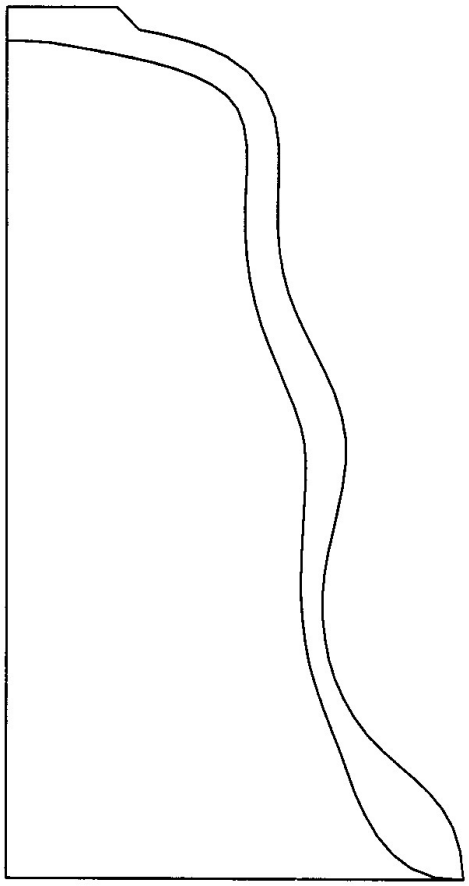
Een bijzondere loot aan de verzameling van afwijkende klokken is de *grote terts-klok* met toonstructuur c^1-c^2-e^2-g^2-c^3. De klok werd dankzij computer-optimalisatie (4.7) in 1985 gevonden. Maar de reacties waren zeer verdeeld. Dat was ook niet verwonderlijk, want niet alleen was de terts verschoven, maar ook de klankkleur van de klok was anders geworden. En dat mag weer niet verbazen als men het model van de klok bekijkt (fig.40). Vooral de uitstulping in de flank moest het in de discussies ontgelden. Later werd het overigens mogelijk om die flank weer een vloeiende lijn te geven. Maar veel invloed op de klank had dit niet.

Het is moeilijk te omschrijven waarin het timbre van de grote terts-klok zich onderscheidt van dat van de kleine terts-klok. Zeker is dat dit verschil vooral tijdens de aanslag en

kort daarna wordt waargenomen. Dat verschil was bovendien duidelijk in het nadeel van de grote terts-klok. Deze klok klonk bij de aanslag niet mooi. Heeft het iets met de inslingertijd van de klank te maken, dus de periode tussen aanslag en volledige ontplooiing van de klokkenklank? Onderzoek in die richting leverde aanvankelijk niets op. Maar wij komen daar zo dadelijk op terug.

	I-2	**II-2**	**I-3**	**II-3**	**I-4**
model 2002	c^1	g^2	e^2	bes^2-	c^3
model 1985	c^1	c^2	e^2	g^2	c^3

Maar wenden wij ons allereerst nog tot een belangrijk moment in de historie sinds de eerste grote terts-klok in 1985. Tien jaar nadat de grote terts-klok haar intrede deed, kwam een geheel andere variant in beeld. In die klok is fors met de partialen geschoven! Bovenstaande tabel maakt dit duidelijk. De klok heeft een priem die een kwint hoger is geworden. Het werd vooral bereikt door de klok minder hoog te maken, tot op de helft van normaal. Gelijktijdig ging daarmee de kwint omhoog die ten naaste bij naar de harmonische septiem (7/4 of bes-31 cents) verschoof. Tot nog toe werd slechts één beiaard volgens dit type gemaakt en wel in 2002 voor het Nationaal Beiaardmuseum te Asten.



Figuur 40: Grote terts-klok (2006).

Tot slot zij opgemerkt dat de verschiltoon tussen de grote terts I-3 en het octaaf I-4 twee octaven onder de slagtoon c^2 ligt, dus op c-klein. Zoals dat in 4.5 werd uiteengezet, is dat bij de kleine terts een grote terts lager, namelijk As-groot. Het is een van de redenen waarom de grote terts-klok als harmonischer wordt ervaren. Sommigen waarderen dat niet, anderen daarentegen wel. In elk geval is het een groot voordeel als de beiaard samen speelt met een harmonie. Maar ook komt het de verstaanbaarheid van de melodieën ten goede. De vraag is overigens of de tegenstanders van een meer harmonische klok hun afwijzen laten bepalen door hun opleiding. Beiaardiers zijn opgeleid op beiaarden met kleine tertsklokken. Ook de muziek die zij spelen is daarop gebaseerd. Ervaren zij de grote terts-beiaard wellicht als een inbreuk op wat ze gewend zijn? Het zou wel eens

een rol kunnen spelen.

Maar keren wij terug naar de inslingertijd van de grote terts-klok en wat daar mis mee kan zijn. Het antwoord lijkt niet moeilijk indien wij beseffen dat elke grote terts-klok, van welk model ook tot 2002 ontwikkeld, een veel te lage duodeciem heeft, tot zelfs vijftig cents. De consequentie is evident: de klokkenklank komt weliswaar na de aanslag tot stand, doch zonder een slagtoon, of althans geen duidelijke, allesoverheersende slagtoon. Het lijkt triviaal, alsof dit al niet veel eerder vastgesteld had kunnen worden. Men dient echter de beseffen dat de kennis over de slagtoon, althans in afwijkende situaties, betrekkelijk recent is. Maar op basis van die kennis was het thans mogelijk met behulp van computer-ontwerpen en lineaire optimalisatie een nieuwe grote terts-klok te ontwerpen en dit maal met een juiste duodeciem. Het resultaat (figuur 40) was verrassend, want deze klok heeft een prachtige slagtoon en daarmee een fraaie aanslagklank. Wij schrijven dan najaar 2006. Nochtans, sommigen zullen het als een bezwaar zien dat de oorspronkelijke uitstulping in de flank is teruggekeerd. Met dat was het gevolg van de eis dat niet alleen de vijf laagste partialen exact zouden zijn, doch bovendien ook nog eens de duodeciem. Voorwaar een tour de force voor een klokprofiel.

5 TOONSTELSELS

5.1 De reine of natuurlijke stemming

Het is altijd wat frustrerend wanneer men begrippen uit de algemene muziekleer niet met klokken kan uitleggen, doch moet uitwijken naar andere muziekinstrumenten, bijvoorbeeld het orgel. In 4.1 hebben wij de partialen van een orgelpijp aan de orde gesteld. De resultaten verenigen wij in onderstaande tabel.

partiaal	c^1	c^2	g^2	c^3	e^3	g^3	bes^3-	c^4	d^4
verhoudingsfreq.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
cents	0	1200	1902	2400	2786	3804	3369	3600	3804

De eerste rij geeft de eerste negen partialen, de tweede de verhoudingsfrequentie wanneer die van de grondtoon op 1 wordt gesteld. En de derde rij tenslotte de omrekening in cents.

Wanneer wij naar de afzonderlijke intervallen kijken, dan heeft het octaaf met 1200 cents een verhouding 2/1, de kwint met 702 cents 3/2, de kwart met 498 cents 4/3, de grote terts met 386 cents 5/4, de hele toon met 204 cents 9/8 enz. Blijkbaar kan op die wijze een diatonische toonladder worden opgebouwd. Reeds in de Oudheid werd dat gedaan ofschoon de definitieve reine toonladder niet eerder dan in de zestiende tot stand kwam. De tabel toont dat resultaat. De harmonische septiem (7/4 of 969 cents) werd altijd buiten beschouwing gelaten.

toon	c	d	e	f	g	a	b	c^1
freq.verh.	1/1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2/1
cents	0	204	386	498	702	884	1088	1200

Opgemerkt moet worden dat over de grote sext en grote septiem nog al eens discussie werd gevoerd. Wij zullen daar hier niet op ingaan. Belangrijker is de opmerking dat deze toonladder geen transpositie toelaat. Om een voorbeeld te noemen, de kwint d-a heeft een verhouding van (5/3)/(9/8) = 40/27 hetgeen met 884 – 204 = 680 cents overkomt. Geen kwint van 702 cents derhalve. Vanuit die beperking moge het duidelijk zijn dat de reine stemming geen chromatische tonen kent. Verder moet opgemerkt worden dat de reine stemming in de muziek nooit van enige betekenis is geweest. Bij de behandeling van luidklokken zal duidelijk zijn of en in welke mate deze stemming voor klokken iets betekenen kan.

5.2 De middentoonstemming

In de reine stemming wordt naast het octaaf en de kwint de reine grote terts centraal gesteld. Twee pijpen c^1 en e^1 die op 386 cents op elkaar zijn afgestemd, laten een volkomen consonante klank horen. En dat is ook te verwachten, want de inwendige terts van de laagste pijp $c^1 \pm 0$ cents, namelijk de vierde boventoon e^3-14 cents, valt geheel samen met de derde boventoon e^3-14 cents van de tweede pijp e^1-14 cents. Dit gegeven staat centraal in de *middentoonstemming*. En zelfs in die mate dat de kwint daaraan ondergeschikt wordt gemaakt.

Dat was in de zestiende eeuw. Men koos toen als uitgangspunt dat twee octaven plus een reine grote terts gelijk moet zijn aan vier aangepaste kwinten. Of in cents 1200 + 1200 + 386 = 4 middentoonkwinten. Gemakkelijk rekent men vervolgens uit dat de middentoonkwint 696½ cents bedraagt, derhalve 5½ cents kleiner dan de reine kwint van 702 cents.

Om vervolgens de tonen van een chromatische toonladder te bepalen is eenvoudig. Gelijktijdig komen dan ook de beperkingen van deze stemming aan het licht. Men dient namelijk een keuze uit de mogelijke chromatische tonen te maken. De tabel geeft de gebruikelijke keuze in de vorm van een kwintencirkel op basis c^1.

Es	Bes	f	c^1	g^1	d^2	a^2	e^3	b^3	fis^4	cis^5	gis^5
-2089	-1393	-696	0	696	1393	2089	2786	3482	4179	4875	5572

Hieruit een toonladder te formeren is verder niet moeilijk. Met octaafsprongen van 1200 cents zijn namelijk alle tonen binnen één octaaf te brengen. De volgende tabel geeft het resultaat in hele cents waarbij wij gemakshalve de cents-intervallen als afwijkingen ten opzichte van de hedendaagse evenredig zwevende temperatuur noteren.

c^1	cis^1	d^1	es^1	e^1	f^1	fis^1	g^1	gis^1	a^1	bes^1	b^1
0	-25	-7	+10	-14	+4	-21	-4	-28	-11	+7	-18

Opgemerkt zij dat in deze stemming de hele toon d precies halverwege de grote terts c - e ligt. Vandaar ook de naam *middentoon*stemming.

Blijkens de opsomming heeft men niet de beschikking over des, dis, ges, as en ais waarbij wij verdere chromatiek maar achterwege laten. Hun centswaarde kan men gemakkelijk uitrekenen door de kwintencirkel zowel links als rechts uit te breiden. Men zal dan inderdaad ontdekken dat des niet gelijk is aan cis enz. Een dis bijvoorbeeld maakt een interval van 268 cents met de grondtoon c, terwijl een es 310 cents meet. Het verschil tussen beide is niet minder dan 42 cents. Dat verschil keert ook terug in het interval gis- es^1, dat bekend staat onder de naam *wolfskwint*. Het meet namelijk 738 cents, 42 cents meer dan de middentoonkwint. In feite is het dan ook een verminderde sext. Laat men beide tonen gelijktijdig op een orgel klinken, dan hoort men zulke snelle zwevingen dat het aan het huilen van een wolf doet denken. Vandaar de naam.

Het bovenstaande betekent tevens dat slechts in een beperkt aantal toonladers gespeeld kan worden. Dat zijn majeur-toonaarden Bes, F, C, G, D en A. In E kan niet omdat geen dis beschikbaar is. In B al evenmin omdat ook de ais ontbreekt enz. In de melodische mineurtoonaarden zijn beschikbaar g, d, a, e, b en fis. En ook daar is verdere uitbreiding niet mogelijk.

Over de betekenis van de middentoonstemming voor de beiaard zullen wij later spreken. Hier merken wij slechts op dat van het grote voordeel op een orgel, namelijk volkomen consonante grote terts-samenklanken, op een beiaard geen sprake is. Immers, klokken hebben geen grote, doch een kleine terts als partiaal. De middentoonstemming dient derhalve aan die boventoon getoetst te worden. Maar, zoals gezegd, wij komen daar nog op terug (7.3).

5.3 De evenredig zwevende stemming

De evenredig zwevende stemming die dikwijls ten onrechte dé getemperde stemming wordt genoemd, draagt als kenmerk dat alle intervallen van een halve toon aan elkaar gelijk zijn. Het octaaf wordt per definitie op 1200 cents gesteld en elke halve toon meet dan 100 cents. Deze stemming werd reeds in de tweede helft van de zestiende eeuw geformuleerd, doch zou pas in de achttiende eeuw gaandeweg toepassing vinden.

In de evenredig zwevende stemming kan derhalve onbeperkt gemoduleerd worden, zijn enharmonische verwisselingen mogelijk, ja men er de twaalf toonstechniek mee toepassen. Maar het heeft zijn prijs voor muziekinstrumenten met harmonische boventonen. Maar het offer was niet gering. Wij tonen dit aan met het akkoord c-e-g op een orgel dat in de evenredig zwevende stemming werd gemaakt. Schrijven wij de boventonen van elke pijp op dan ontstaat het volgende beeld.

c-pijp	c			c^1		g^1+2		e^2-14	enz.
e-pijp		e			e^1		b^1+2	e^2	enz.
g-pijp			g			g^1			enz

Duidelijk blijkt dat de beide g1-boventonen 2 cents van elkaar verschillen en de beide 2-boventonen zelf 14 cents. Er ontstaan dus zwevingen. Voor de g^1 zal dat relatief weinig zijn, namelijk niet meer dan 0,45 Hz., dus 0,45 zwevingen per seconde. Maar bij de e^2 is dat aanzienlijk meer, namelijk 5,29 Hz. En men bedenke, één octaaf hoger, dus bij c^1-e^1-g^1, zijn die zwevingen al verdubbeld. Maar wij zijn eraan gewend en slechts weinig luisteraars, maar ook musici hebben de weldadige rust van de middentoonstemming op instrumenten met harmonische boventonen gehoord. Maar, ons verhaal wordt eentonig, voor klokken en beiaarden geldt een geheel andere toets. Wij komen daar nog op terug (7.4).

6 GELUIEN

6.1 Het principe van de dynamische gelijkvormigheid

Tot nog toe werd vrijwel uitsluitend gesproken over de eigenschappen van de individuele klok. Onderlinge relaties kwamen nauwelijks aan bod, evenmin als afmetingen en gewichten. Thans echter zal dat aspect aan de orde gesteld moeten worden. Immers, geluien bestaan uit twee of meer klokken die in klank en toon op elkaar afgestemd worden. De vraag luidt derhalve hoe dit doel bereikt wordt.

In 4.7 werd uiteengezet hoe een enigszins gewijzigd model van een bestaande klok de klokkengieter als standaard dient. Stel dat dit een a^1-klok is met een grootste doorsnede van 925 mm bij een gewicht van 450 kg indien de klok géén kroon bezit en 485 kg indien wél een kroon op de klok gegoten wordt. Opgemerkt zij hierbij dat een kroon nauwelijks enige invloed op de klank heeft. Ook in technisch opzicht is een kroon niet strikt noodzakelijk. Men kan namelijk een klok even gemakkelijk aan haar kroon ophangen als door middel van bouten die door gaten in de kop van de klok gestoken worden. Rest in feite alleen een visueel belang, want een klok met kroon is nu eenmaal fraaier dan een klok zonder kroon. En daar een kroon circa 7% van het klokgewicht uitmaakt, wordt dat visuele probleem herleid tot een financieel vraagstuk. Is het namelijk de moeite waard 7% meer te betalen, want daar komt het op neer, uitsluitend omwille van een esthetisch voordeel? De praktijk leert dat die vraag voor luidklokken meestal bevestigend wordt beantwoord; voor speelklokken die in een groter aantal gelijktijdig worden aangeschaft, vrijwel altijd ontkennend.

Uitgaande van de standaard a^1-klok worden de overige luidklokken met behulp van het *principe van de dynamische gelijkvormigheid* berekend en getekend. Om een concreet voorbeeld te noemen, dit principe zegt dat wanneer alle afmetingen van een klok, dus diameter, hoogte, wanddikte en alle overige maten, met een factor 2 vergroot worden, de frequenties van de partialen gereduceerd zullen worden met een factor 1/2. Of om een ander voorbeeld te noemen. verkleint men alle afmetingen met een factor 3/4, dan zullen de partialen in frequentie met een factor 4/3 verhoogd worden. Teneinde de klokgroottes te kunnen berekenen heeft men dus de frequentieverhoudingen nodig tussen de verschillende tonen.

In de tabel zijn deze nogmaals genoteerd voor de heden ten dage toegepaste stemming, de evenredig zwevende stemming of minder correct geformuleerd, de getemperde stemming.

interval	verhouding
c-c	1,000000
c-cis/des	1,059463
c-d	1,122462
c-dis/es	1,189207
c-e	1,259921
c-f	1,334840
c-fis/ges	1,414214
c-g	1,498307
c-gis/as	1,587401
c-a	1,681793
c-ais/bes	1,781797
c-b	1,887749
c-c’	2,000000

Frequentieverhoudingen in de evenredig zwevende stemming.

toon	diameter (mm)	gewicht z.kr. (kg)	gewicht m.kr. (kg)
c	3112	17130	18455
cis	2916	14400	14720
d	2772	12110	13050
dis	2516	10185	10975
e	2470	8560	9232
f	2331	7200	7760
fis	2200	6054	6525
g	2077	5091	5487
gis	1960	4281	4614
a	1850	3600	3880
ais	1746	3027	3263
b	1648	2546	2744
c^1	1556	2141	2307
cis^1	1468	1800	1840
d^1	1386	1514	1631
dis^1	1308	1273	1372
e^1	1235	1070	1154
f^1	1165	900	970
fis^1	1100	757	816
g^1	1038	636	686
gis^1	980	535	577
a^1	925	450	485
ais^1	873	378	408
b^1	824	318	343
c^2	778	268	288
cis^2	734	225	242
d^2	693	189	204
dis^2	654	159	171
e^2	617	134	144
f^2	583	112	121
fis^2	550	95	102
g^2	519	80	86
gis^2	490	67	72
a^2	462	56	61
ais^2	437	47	51
b^2	412	40	43
c^3	389	33	36
cis^3	367	28	30
d^3	346	24	25
dis^3	327	20	21
e^3	309	17	18

Afmetingen en gewichten van luidklokken

De toepassing op de klokafmetingen is dan verder eenvoudig. Een dis^2-klok bijvoorbeeld, een tritonus boven de standaard a^1, zal een diameter moeten krijgen van 925/1,414214 = 654 mm. Vanzelfsprekend zullen ook de overige afmetingen van de klok met die factor verminderd moeten worden. Of een ander voorbeeld, een c^1-klok klinkt een grote sext lager dan de standaard a^1. De c^1 krijgt derhalve een doorsnede van 925 x 1,681793 = 1556 mm. In de tabel zijn de resultaten van dit soort berekeningen verenigd voor de klokken van c t.m. e^3.

Ook het gewicht van een klok wordt berekend met behulp van de frequentieverhoudingen. De gedachte die daarbij ten grondslag ligt, is de volgende. Stel men heeft een kubus met zijden van 1 dm. Uitgevoerd in brons zou deze ongeveer 8½ kg wegen. Neemt men vervolgens een kubus met zijden die dubbel zo lang zijn, dus 2 dm, dan zal de inhoud en daardoor het gewicht $2^3 = 8$ maal zo groot zijn. De kubus van 2 dm weegt derhalve 8 x 8½ = 68 kg. Het zal duidelijk zijn dat wanneer de zijden tot bijvoorbeeld 1½ dm vergroot worden, het gewicht zal stijgen tot $1½^3$ x 8½ = bijna 29 kg.

Een dergelijke redenering kan men ook op de klok toepassen door deze opgebouwd te achten uit een groot aantal zeer kleine kubusjes. Zulks betekent dat wanneer alle afmetingen van de klok twee maal zo groot worden gemaakt, het gewicht met een factor $2^3 = 8$ zal stijgen. Een a^1-klok met kroon weegt 485 kg. Daar de a^2 twee maal zo klein is, zal haar gewicht acht maal zo klein zijn, dus 485/8 is ongeveer 61 kg. Natuurlijk geldt dit ook voor meer gecompliceerde verhoudingen. Het gewicht van de d^1 bijvoorbeeld wordt voor een uitvoering zonder kroon aldus vastgesteld: $1{,}498307^3$ x 450 = 1514 kg. Of een c^3 met kroon: $485/(2x1{,}189207)^3$ = 36 kg. Gemakkelijk is voorts te weten dat twee klokken op een grote terts in de evenredig zwevende stemming een gewichtsverhouding bezitten van $1{,}259921^3 = 2$. De resultaten van dergelijke berekeningen voor alle klokken zonder en met kroon zijn in de tabel verenigd. Opgemerkt zij daarbij dat de gewichten op hele kilo's zijn afgerond.

6.2 Typen geluien

Het gaat vanzelfsprekend niet aan om een willekeurig aantal klokken met willekeurige tonen samen te voegen en dit vervolgens als een *gelui* te bestempelen. Men zou niets anders horen dan een slordig door elkaar klinken van klokkentonen zonder enige muzikale samenhang. De tonen van een gelui moeten dan ook met zorg gekozen worden. Daarbij kunnen de volgende overwegingen een rol spelen.

Het ligt voor de hand dat een lage, weinig omvangrijke toren slechts enkele klokken of wellicht slechts één vraagt van relatief klein formaat, dus licht in gewicht. Omgekeerd zal een zware en massale toren graag meerdere zwaardere klokken laten horen. Het type toren bepaalt derhalve in hoge mate het karakter van de luidklok of het gelui. Min of meer parallel daarmee loopt de beschikbare ruimte in de toren. Een luidklok immers moet over relatief veel ruimte kunnen beschikken, zodat reeds op die technische grond het onmogelijk is een kleine toren van een zware klok te voorzien. Gelijktijdig wordt daarmee weer bevorderd dat een lage toren die gewoonlijk klein van omvang is, van lichte klokken wordt voorzien. Zware klokken zouden namelijk voor de omwonenden op de lange duur ondraaglijk worden.

Het zal duidelijk zijn dat dit soort overwegingen bij de aanschaf van een gelui een belangrijke rol moeten spelen, zonder dat evenwel zeer precieze regels opgesteld kunnen wor-

den die te allen tijde een pasklaar antwoord geven. Na deze beschouwingen zal het daarom goed zijn de samenstelling van een gelui voor een ogenblik uitsluitend afhankelijk te stellen van tonale overwegingen.

melodische geluien					**harmonische geluien**					
majeur			**mineur**		**majeur**			kwart-sext		
c										
d			es		e			f		
e	f		f		g	g		g	a	
g	g		g	as	bes	a	bes	a	c^1	
a	a	bes	bes	bes	c^1	c^1	c^1	c^1	d^1	es^1

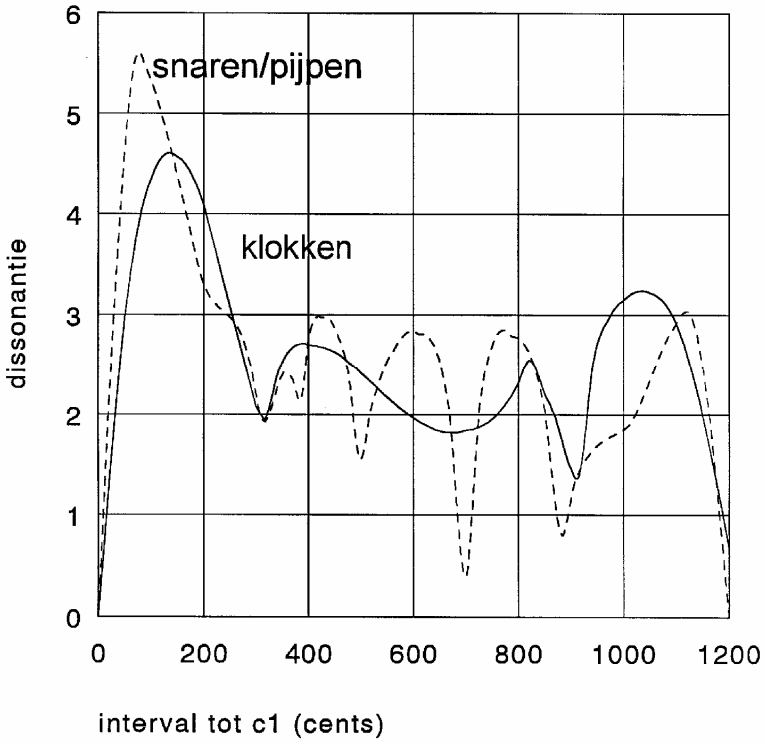
In bovenstaande tabel zijn de gebruikelijke mogelijkheden tot en met een vijf-gelui gegeven. Als basis van elk gelui werd de c gekozen. Transpositie naar andere toonaarden kan vanzelfsprekend zonder enig bezwaar. De wijze waarop de tabel gelezen moet worden, kan wellicht het beste met enkele voorbeelden geïllustreerd worden. Zo ziet men gemakkelijk dat een melodisch mineurgelui van vijf klokken zowel c-es-f-g-bes kan zijn als c-es-f-as-bes of c-es-g-bes-c^1. Of om een ander voorbeeld te nemen, het harmonisch gelui van drie klokken waarin de intervallen kwart en sext domineren, bezit de tonen c-f-a.

Voorts is in de tabel een duidelijke scheiding aangebracht tussen melodische en harmonische geluien. Dit is zeker niet zonder betekenis. Indien men zich namelijk realiseert dat kleine klokken aanzienlijk sneller luiden dan zware, zal men begrijpen dat in het algemeen een harmonisch gelui het meest geschikt is voor lichte luidklokken en een melodisch voor zware. Bij de laatste immers zullen de klepelslagen vrijwel steeds achter elkaar gehoord worden zodat hele tonen bijvoorbeeld niet dissonerend behoeven te werken. Bij een gelui met kleine klokken daarentegen klinken als het ware alle klokken voortdurend gelijktijdig zodat bij deze harmonische combinaties het meest op hun plaats zijn.

Een verdere verfijning is aangebracht met de typering mineur, majeur en kwart-sext. Daarbij zal nauwelijks betoogd behoeven te worden dat het mineur-karakter het beste bij klokken past, en zeker wanneer het gelui uit slechts enkele klokken bestaat. Een c^1-klok immers heeft als kleine terts een es^1, zodat bij samenklinken met een es^1-klok de consonantie zo gunstig mogelijk zal zijn, althans beter dan wanneer aan de c^1 een e^1 of f^1 toegevoegd wordt.

Met dit laatste treedt ook een merkwaardig harmonisch aspect van klokken aan het licht. Mag men bijvoorbeeld stellen dat bij snaren, orgelpijpen en andere meer vertrouwde muziekinstrumenten de grote terts consonanter is dan de kleine terts, bij klokken ligt dat geheel anders. Het zal duidelijk zijn dat hier de afwijkende boventoonstructuur van de klok debet aan is. In figuur 41 is dat met een grafiek nader duidelijk gemaakt. Getoond wordt de dissonantie in een arbitraire schaal wanneer een c^1-klok samenklinkt met één der klokken op het centsinterval dat op de horizontale as is genoteerd. In verticale richting kan men vervolgens de dissonantie aflezen.

Twee klokken c^1 zijn uiteraard volkomen consonant. Zij geven dan ook een dissonantie van nul. Zowel een cis^1 als een d^1 zullen in hoge mate wringen met de c^1. Men bevindt zich dan ook binnen de kritieke band. Dan wordt het snel minder naarmate de kleine terts bereikt wordt om vervolgens voor de grote terts weer iets te stijgen enz. Merkwaardig is vooral dat de



Figuur 41: Dissonantie van twee klokken en twee snaren.

samenklank c^1-a^1 (900 cents) als het minst storend ervaren wordt, ja zelfs nog minder dan een kleine terts. Kennelijk speelt hierbij een rol dat de boventonen in deze combinatie onderling het verst van elkaar verwijderd blijven. In de figuur is tenslotte nog de octaafsamenklank genoteerd. Deze is bijzonder consonant hoewel niet maximaal. Bij dit alles moet men zich realiseren dat men voor een twee-gelui weliswaar klokken kan kiezen die op een groot interval van elkaar liggen, bijvoorbeeld meer dan een kwart, maar dat anderzijds twee klokken met de tonen c^1 en a^1 althans in karakter te veel van elkaar verschillen om nog een eenheid te kunnen vormen.

De vorengaande restrictie op de puur tonale mogelijkheden moet nog uitgebreid worden met de opmerking dat een gelui geen te kleine basisklok mag krijgen. In dat opzicht is de tabel met tonen en afmetingen van luidklokken eigenlijk al te hoog doorgevoerd. De klokken van het drie gestreept octaaf zijn dan ook meer bedoeld als individuele klokken in torentjes van kapellen, raadhuizen enz. Een praktische regel is daarom ernaar te streven dat de basisklok van een gelui zo mogelijk 200 kg of meer weegt en zeker niet minder dan 100 kg.

c-d-f	Gloria-motief
c-es-f	Te Deum-motief
c-e-g-a	Salve Regina-motief
c-d-f-g	Gloria Te Deum-motief

Een laatste opmerking moet tenslotte nog gemaakt worden. Sommige geluien hebben in katholieke kringen een naam naar vroeger veel voorkomende gezangen gekregen. De tonen van het desbetreffende gelui vormen daar dan de begintonen van. Nevenstaande tabel geeft meer informatie. Die namen zijn overigens vrijwel in onbruik geraakt.

Men zal bemerkt hebben dat in het voorafgaande een wezenlijk aspect van het gelui onbesproken is gebleven, namelijk de eigen tempi of tempo's waarin de klokken schommelen en aangeslagen worden. Deze tempo's hangen ten nauwste samen met het gewicht en afmeting van de klokken en zijn daarom voor elke klok anders. Het geeft een aantrekkelijk ritmisch klankspel. Deze belangrijke kwestie zal in 9.2 nader aan de orde worden gesteld.

6.3 De stemming van geluien

Het lijkt voor de hand te liggen dat de stemming die heden ten dage in de instrumentale muziek wordt gebruikt ook voor luidklokken van toepassing is. In die stemming, bekend onder de naam evenredig zwevende stemming, wordt het octaaf (1200 cents) in twaalf gelijke halve tonen van 100 cents verdeeld (5.3). Aldus maakt het weinig uit of men twee grote tertsen aan elkaar voegt door middel van de reeks c-e-gis, dan wel vanuit de c^{l} een grote terts omlaag gaat naar as. Beide tonen, gis en as, zijn immers aan elkaar gelijk geworden. Onbeperkt moduleren is daarvan het voordeel, evengoed als de 12-toons muziek zonder bezwaar beoefend kan worden.

De evenredig zwevende stemming werd destijds bewust gekozen omwille van de gesignaleerde voordelen. In 5.3 hebben wij daar al over gesproken. Hier moge slechts vastgesteld worden dat het niet zo vanzelfsprekend is om die stemming zonder meer op luidklokken over te dragen. Immers, de genoemde voordelen van die stemming zullen bij een gelui nooit tot hun recht komen. Het lijkt daarom voor de hand te liggen dat voor luidklokken teruggegrepen wordt naar een oudere stemming en met name naar de natuurlijke of reine stemming. Toch is dat niet zo vanzelfsprekend als het lijkt.

Zoals wij in 5.1 uiteengezet hebben, is de grondgedachte van de reine stemming dat de intervallen bepaald worden door zo eenvoudig mogelijke frequentieverhoudingen. Aldus bereikt men dat de primaire samenklanken zo consonant mogelijk klinken, althans bij instrumenten met harmonische boventonen (orgel, piano, viool, menselijke stem enz.). Deze boventonen immers bezitten dezelfde rekenkundige relaties als de reine stemming. Strikt genomen zijn de harmonische kwaliteiten van die stemming daarom van geen enkel belang voor klokken. Vanuit die gezichtshoek is de keuze van de natuurlijke stemming voor luidklokken dan ook hoogst aanvechtbaar. Immers, waar een klok een totaal andere boventoonstructuur heeft dan een orgelpijp enz., behoeft men bij klokken niet voor disharmonieën te vrezen als van de natuurlijke stemming wordt afgeweken. Noodzakelijk is slechts dat die afwijkingen zowel voor de in- als uitwendige stemming gelden. Wenselijk daarbij is vanzelfsprekend dat men zich omwille van de herkenbaarheid niet al te ver van de traditionele stemmingen verwijdert. Hiermee wordt natuurlijk de deur open gezet voor allerlei al of niet aanvaardbare persoonlijke correcties op de natuurlijke stemming, correcties die bij pijpen met hun vaste inwendige stemming onmiddellijk tot zwevingen aanleiding zouden geven. Wanneer men namelijk, om een voorbeeld te noemen, een c^{l}-pijp om welke reden dan ook tien cents te hoog zou stemmen ten opzichte van de een octaaf lager klinkende de c-pijp, zou de eerste boventoon c^{l} van laatstgenoemde pijp felle zwevingen geven met de grondtoon van de c^{l}-pijp die tien cents hoger ligt.

Hoe veel eleganter is dit bij luidklokken op te lossen. Bij deze immers behoeft de in- en uitwendige stemming slechts op elkaar afgestemd te worden. De betrokken klokken zouden namelijk de volgende in- en uitwendige stemming dienen te krijgen:

c-10	c^{1}	(es^{1})	(g^{1})	$c^{2}+10$		(g^{2})	
	c^{1}			$c^{2}+10$	(es^{2})	(g^{2})	$c^{3}+20$

Op die wijze zou volgens sommigen aan de octaafrelatie meer spanning gegeven kunnen worden. Op hetzelfde vlak ligt de zo gevoelige kleine terts-relatie.

De reine stemming vraagt volgens de tabel een zestien cents te hoge kleine terts ten opzichte van de evenredig zwevende. Vandaar dat dit ook bij de inwendige stemming van luidklokken wordt nagestreefd. Daar komt nog bij dat volgens sommigen de klok met een hoge inwendige terts meer glans krijgt. Een goede onderbouwing voor die stelling is tot op heden niet gegeven. Ze lijkt dan ook onwaar te zijn. Nochtans, wordt bij een verhoogde tertspartiaal ook de onderlinge relatie aldus gestemd, dan zal men een aangename consonantie horen:

c		c^1	es^1+16		g^1+2		c^2	
	es+16		es^1+16	ges^1+32		bes^1+18		es^2+16

Zoals men ziet is aan de kwint-boventoon de ideale relatie van 702 cents gegeven, iets wat met het oog op het ontbreken van corresponderende harmonische boventonen weinig effect zal hebben. Anderzijds kan dit niet impliceren dat de kwint-partiaal elke willekeurige waarde mag bezitten. Want niet alleen zal het gehoor een redelijk zuivere kwint onder alle omstandigheden op prijs stellen, doch bovendien zal een erg onzuivere kwint zoveel repercussies voor het profiel hebben dat het timbre van de klok nadelig beïnvloed kan worden. In 4.8 hebben wij daar reeds op gewezen.

Kleine afwijkingen van de reine stemming zijn dus steeds aanvaardbaar, zoals bijvoorbeeld een te lage inwendige kleine terts die tot het volgende toonbeeld behoort te leiden:

c		c^1	es^1+5		g^1+2		c^2	
	es+5		es^1+5	ges^1+10		bes^1+7		es^2+5

Vanzelfsprekend kunnen ook andere intervallen minder juist getroffen worden, hetzij door onnauwkeurigheid van de stemmer, hetzij omdat het profiel van de desbetreffende klok onvoldoende ruimte biedt. Het volgende stemmingsbeeld is dan ook beslist niet denkbeeldig, even goed als er talloos andere aan de praktijk ontleend kunnen worden:

c		c^1+1	es^1+8		g^1-6		c^2-4	
	es+10		es^1+7	ges^1+12		bes^1+21		es^2+1

Tot nog toe kozen wij uitsluitend voorbeelden met een samenvallende partiaal. Is dat niet het geval dan behoeft men alleen maar te streven naar herkenbare intervallen. Het vorenstaande illustreert dat ook. Immers, de grondtoon van de es^1-klok zou bijvoorbeeld bepaald wel iets hoger mogen zijn zonder dat dit tot storende samenklanken leidt. Klokkengieters maken van dit gegeven soms bewust gebruik.

Doch welke nauwkeurigheid dient nagestreefd te worden? De praktijk leert dat wanneer de individuele klokken van een gelui voldoen aan de normen zoals die in 4.8 gegeven worden, de intervallen tussen de klokken onderling met een maximale afwijking van vijf cents ten opzichte van het ideaal beslist nauwkeurig genoeg getroffen zijn. Met verwijzing naar het

voorafgaande moet hierbij echter het beding gemaakt worden dat die nauwkeurigheid groter dient te zijn in gevallen waarin sterke partialen van de samenklinkende klokken op nagenoeg gelijke toonhoogte liggen. In die situatie immers kunnen zwevingen ontstaan die bij afwijkingen van zelfs vijf cents reeds als storend worden ervaren.

Dit impliceert dat in het algemeen twee klokken op een kleine terts en een octaaf nauwkeuriger op elkaar afgestemd dienen te worden dan op een kwart bijvoorbeeld. Bij dit alles dient men te bedenken dat het hier om luidklokken gaat, dat deze klokken een ritmisch klankspel in een vrij snel tempo uitvoeren en derhalve lang niet zo nadrukkelijk de aandacht kunnen vestigen op toonhoogtes als bij speelklokken in een beiaard het geval is. Vandaar dat men enige soepelheid mag betrachten en zijn aandacht vooral op de klank moet richten. Bij luidklokken zullen de stemmingsnormen daarom nimmer primair mogen zijn. Deze zijn te allen tijde ondergeschikt aan het gehoor dat de totaliteit ervaart. Alleen dat gehoor zal mogen beslissen. Het wordt daarbij geholpen, en meer ook niet, door regels zoals die in het voorafgaande ontwikkeld werden.

7 DE BEIAARD

7.1 Algemene oriëntering

Om te beginnen is het goed een misverstand uit de wereld te helpen. Het Franse woord *carillon*, het Vlaamse woord *beiaard* en het Nederlandse woord *klokkenspel* zijn althans in het Nederlandse taalgebied synoniemen. In het algemeen duiden deze woorden een reeks speelklokken aan waarop via een automaat en/of met de hand vanuit een klavier melodieën gespeeld worden. Niet alle klokkenspelen bezitten echter beide inrichtingen. In de praktijk hebben zich namelijk enkele globale regels ontwikkeld. Zo zal een beiaard met minder dan twee octaven klokken meestal niet van een klavier worden voorzien. Dergelijke spelen zijn dan uitsluitend automatisch bespeelbaar. Ze dienen derhalve in de eerste plaats om een al of niet korte melodie te geven als inleiding op de uur- en halfuurslag op een gewoonlijk zwaardere klok en voorts voor het geven van een klein melodisch fragment op de kwartieren. Doorgaans zijn de klokken in zo'n spel betrekkelijk licht. Gezien hun specifieke functie wordt dit soort beiaard ook wel *voorslag* genoemd. In het bijzonder wordt deze naam gehecht aan carillons met minder dan 1½ octaaf klokken. Om die reden verstaan wij in het navolgende onder een beiaard een reeks speelklokken van tenminste l½ octaaf waarop hetzij door middel van een klavier, hetzij met behulp van een automatisch speelwerk muziek ten gehore kan worden gebracht.

Vooraleer wij echter de voorslag verlaten, is het goed nog een enkel woord aan de toonkeuze van zo'n spel te wijden. Zo ligt het bijvoorbeeld niet voor de hand om bij een reeks over één octaaf naast de diatonische tonen ook alle chromatische te kiezen. Voor de weergave van eenvoudige wijsjes zou de toevoeging van een bes reeds voldoende zijn. Vervolgens is een uitbreiding met een lage fis en een hoge d aantrekkelijk, evengoed als een onderkwart bij volkswijsjes uitstekend bruikbaar is. In het laatste geval zou de voorslag beginnen met de tonen g^2-c^3-d^3-e^3. Kortom, er zijn talrijke mogelijkheden die gekoppeld zijn aan de muzikale wensen die men stelt. Wanneer men bijvoorbeeld uitsluitend de Westminster-melodie zou willen geven, zou een reeks g^2-c^3-d^3-e^3 reeds voldoende zijn. Nochtans kan men in het algemeen de regel hanteren dat wanneer men de omvang van één octaaf overschrijdt, alle chromatische tonen ingevoegd worden, zij het met uitzondering van de laagste twee (cis en dis). Op dit punt zullen wij in een volgende alinea nader terugkomen. Een spel van 1½ octaaf bezit derhalve gewoonlijk achttien klokken volgens de reeks c^3-d^3-e^3-chromatisch-g^4. Transpositie is echter uitstekend mogelijk, reden waarom in principe met elke willekeurige toon begonnen kan worden. Ook op dit aspect komen wij nog terug.

Wanneer een beiaard een omvang van twee octaven overschrijdt, wordt meestal een klavier toegevoegd. Noodzakelijk is dat geenszins, evenals het omgekeerde. Zo zijn uitsluitend automatisch spelende carillons van drie octaven geen uitzondering, terwijl vier octaafs spelen met uitsluitend een klavier, zij het minder, eveneens voorkomen. De meeste beiaarden beschikken echter over beide speelinrichtingen. Deze worden behandeld in hoofdstuk 10. De vraag is vervolgens welke omvang voor een beiaard de meest geschikte is.

In de eerste plaats moet dan vastgesteld worden dat veel beiaarden de cis en de dis in de bassen missen. De reden is in feite een financiële. Stel men heeft een carillon op basis c^1.

De cis^1 en de dis^1 wegen dan volgens de tabel ruim 3000 kg. Bedenken wij verder dat een volledig chromatische beiaard op basis c^1 over vier octaven, dus tot en met c^5, bijna 14.000 kg weegt, dan berekent men gemakkelijk dat met het weglaten van de lage cis en dis niet minder dan ruim 20% klokkenbrons gespaard wordt, of financieel gezien, de prijs van de klokken wordt op die manier met ruim 20% verlaagd. Een niet geringe som indien men zich realiseert dat deze klokken betrekkelijk weinig gebruikt worden. Toch is in de laatste decennia van een kentering sprake. Onder invloed van de Mechelse traditie wordt vooral voor zwaardere beiaarden niet gekozen om de cis en dis toe te voegen, doch wel voor de bes en es. Een dergelijk carillon begint dan met de tonen: bes-c^1-d^1-es^1-e^1 en chromatisch verder.

In de gegeven voorbeelden begint de beiaard met een c^1. Nochtans zijn transponerende beiaard erg gebruikelijk, bijvoorbeeld een carillon met f^1 laten beginnen. Een beiaard op basis van f^1-g^1-a^1 wordt dan aan het klavier aangesloten als c^1- d^1-e^1. Of ook wel als bes^1-c^2-d^2. Men merke hierbij op dat transpositie niet verder kan gaan dan over een tritonus. Een beiaard op d^1 bijvoorbeeld wordt daarom aangesloten als op c^1 en niet op c^2. De musicus echter zal onder alle omstandigheden zijn notenschrift op c^1 baseren.

Natuurlijk dient men zich af te vragen of het muzikaal verantwoord is een willekeurige toon als basis te nemen. Of moet men bepaalde regels in acht nemen? Sommigen stellen dat zo eenvoudig mogelijke harmonische relaties met c gekozen moeten worden, dus bij voorkeur f en g. Anderen daarentegen, en zij zijn in de meerderheid, betogen dat men zo dicht mogelijk in de buurt van de c moet blijven, zij het met uitsluiting van de halve toonrelatie. Aldus aanvaarden zij als basistonen voor een beiaard naast c, ook a, bes, d en es.

Het transponeren heeft behalve een financieel voordeel ook een bouwkundige achtergrond. Lang niet alle torens namelijk kunnen een beiaard op c^1 herbergen. Anderzijds zijn ze dikwijls te groot voor een zoveel lichter en kleiner spel op c^2. Door een beiaard te laten transponeren, kan men echter als het ware een spel op maat kiezen. Overigens speelt hierin het aantal klokken natuurlijk ook een rol, hoewel het doorgaans gemakkelijker is enkele kleine klokjes extra in de toren te hangen dan het gehele carillon zwaarder te maken.

In dit verband moet de vraag gesteld worden hoe licht de basisklok van een beiaard mag worden. Regel is hiervoor de es^2 van circa 160 kg als minimum te kiezen, hoewel uitzonderingen met aanzienlijk lichtere klokken, ja zelfs tot en met c^3, ook wel voorkomen. Het spreekt vanzelf dat dergelijke spelen uiterst licht klinken en daardoor de gebruikelijke beiaardmuziek nauwelijks recht doen wedervaren. Omgekeerd is er natuurlijk ook een grens naar beneden. In Nederland en België ligt die bij een e van circa 10.000 kg. In de Verenigde Staten daarentegen gaat men een enkele maal wel eens verder, ja zelfs tot een lage c met een gewicht van ruim achttien ton. In verband met de geringe gehoorgevoeligheid in dit frequentiegebied en de kans op de metaalkwart hebben nog lagere tonen geen enkele zin meer.

Nog belangrijker dan de vraag naar transpositie is die van de omvang van een klokkenspel. Er werd dan weliswaar gesproken over 1½ octaaf en meer, doch welke is de ideale reeks? Beginnen wij met de maximale omvang die 61 klokken is over ruim vijf octaven. Een enkele maal is die wel eens verwezenlijkt met de tonen bes-c^1-d^1-chromatisch-c^6. Doch het blijven uitzonderingen en dit temeer omdat de huidige beiaardliteratuur daar nog niet op is afgestemd. Wanneer men evenwel over de meest ideale reeks spreekt, dan is dat ongetwijfeld vier octaven, dus 47 klokken wanneer de cis en de dis in de bas worden weggelaten. Op c^1 luidt zo'n klokkenspel dan: c^1-d^1-e^1-chromatisch- c^5. Worden de bes en de es^1 toegevoegd dan

heeft men een beiaard met 49 klokken.

Natuurlijk kan een dergelijk carillon ook transponerend uitgevoerd worden. De c^1 kan echter niet verder dan tot c^2 opgeschoven worden daar bij nog verdere transpositie de hoogste klok boven de c^6 zou uitkomen en daarmee van geen waarde meer zijn. De lichtste vier octaafs beiaard moet derhalve genoteerd worden als c^2-d^2-e^2-chromatisch-c^6, waarbij desnoods de bes^1 en es^2 toegevoegd kunnen worden. Natuurlijk heeft zo'n spel een totaal ander karakter dan een zware beiaard. De musicus zal zich dan ook op dit andere timbre dienen in te stellen.

De vier octaafs beiaard wordt in de wandeling wel eens de grote concertbeiaard genoemd. De kleine omspant slechts drie octaven met een secunde. Gewoonlijk begint hij ook met een lichtere basisklok. bijvoorbeeld g^1 of hoger. De notatie luidt derhalve c^2-d^2-e^2-chromatisch-d^5. Uiteraard is het aantrekkelijk nog enkele kleine klokken meer toe te voegen, bijvoorbeeld tot en met f^5 (totaal 40 klokken) of g^5 (42 klokken). De wensen van de musicus en de altijd dwingende eisen der financiën spelen hierin een rol. Het kleinste min of meer genormaliseerde carillon omvat 25 klokken volgens klaviertonen c^2-d^2-e^2-chromatisch-d^4 hoewel ook hier weer tussenvormen met het drie octaafs spel denkbaar zijn. Opgemerkt zij echter dat dergelijke kleine beiaarden ver in de minderheid zijn.

Een laatste aspect dient tenslotte nog genoemd te worden. Het is niet de gewoonte op alle klokken van een beiaard met handspel tevens automatisch spel aan te brengen. Hoewel ook hier weer uitzonderingen voorkomen, zijn de volgende regels in de praktijk gegroeid. Bij een vier octaafs handspel een drie octaafs automatisch spel, drie octaafs handspel een 2½ octaafs automatisch spel enz. Hierbij moet opgemerkt worden dat het automatisch spel doorgaans met de zwaarste klok begint.

7.2 Afmetingen van speelklokken

In 6.1 werd met behulp van het principe van de dynamische gelijkvormigheid een methode ontwikkeld om de afmetingen van luidklokken te berekenen. De tabel met luidklokken in dat hoofdstuk was daar het resultaat van. De vraag luidt nu of deze werkwijze ook op speelklokken toegepast mag worden. Of nog concreter, mogen de in genoemde tabel gegeven afmetingen en gewichten op speelklokken overgedragen worden?

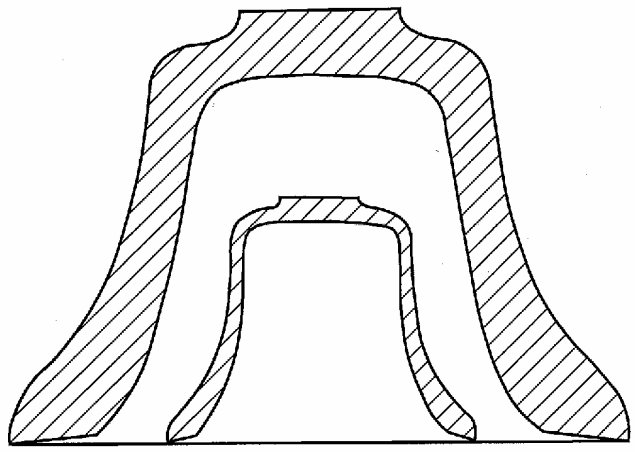
Zoals wij in 7.4 zullen aantonen, heeft een speelklok doorgaans een iets andere inwendige stemming dan een luidklok. Ieder type klok heeft derhalve zijn eigen profiel. Het heeft vooral te maken met de ligging van de kleine terts-partiaal. Anderzijds zijn die verschillen zó gering dat dit noch in de doorsnede noch in het gewicht tot uitdrukking komt. Vanuit die gezichtshoek is de luidklokkentabel zonder meer ook op speelklokken van toepassing, zij het met dien verstande dat speelklokken in de meeste gevallen zonder kroon worden gegoten. De gewichten met kroon hebben in dit verband derhalve weinig betekenis. Nochtans zullen wij zien dat luid- en beiaardklokken slechts tot het begin van het tweegestreept octaaf samengaan.

Ten behoeve van beiaarden die tot en met c^6 kunnen doorlopen, moet genoemde tabel aan de discant uitgebreid worden. Met behulp van het principe van de dynamische gelijkvormigheid berekent men bijvoorbeeld dat een c^5-klok een doorsnede heeft van 97 mm bij een gewicht van ongeveer ½ kg. Een c^6 zou een diameter krijgen van nog slechts 49 mm en niet meer dan ongeveer 65 gram wegen. Vanzelfsprekend heeft dat in relatie tot de zoveel zwaar-

dere basklokken geen enkele zin meer. De discantklokken zouden bij toepassing van deze rekenmethode op straat onhoorbaar zijn.

Teneinde dit probleem op te lossen is maar één middel beschikbaar, namelijk met behoud van toonhoogte de kleine klokjes zwaarder maken. Hoe zwaarder namelijk hoe krachtiger de toon zal zijn. Men weet echter dat een klok niet zonder wijziging van toon een dikkere wand gegeven kan worden. Wil men derhalve de toonhoogte behouden dan zal men niet mogen volstaan met een dikkere wand alleen, ook de diameter moet dan groter worden gemaakt. Het volgende voorbeeld met afgeronde getallen kan dit verduidelijken.

Een c^5 zou volgens bovenstaande berekeningen een doorsnede van 97 mm en een gewicht van ½ kg krijgen. Verdubbelt men de dikte van de wand, dan stijgt het gewicht tot 1 kg, terwijl de toonhoogte globaal met één octaaf zal stijgen. Immers, een verdubbeling van de wanddikte komt ruwweg gesteld overeen met een frequentieverhouding 2/1. De toon is dan dus c^6. Teneinde weer terug te kunnen keren naar c^5 moet het principe van de dynamische gelijkvormigheid toegepast worden. De klok wordt in alle afmetingen twee maal zo groot gemaakt waarmee de diameter 194 mm wordt en het gewicht 8 x 1 = 8 kg. Het resultaat ziet men in figuur 42 geschetst. Een kleine c^5 met het gebruikelijke profiel; een grote c^5 met een naar verhouding aanzienlijk dikkere wand.



Figuur 42: Twee c^5-klokjes (doorsnede 97 en 194 mm).

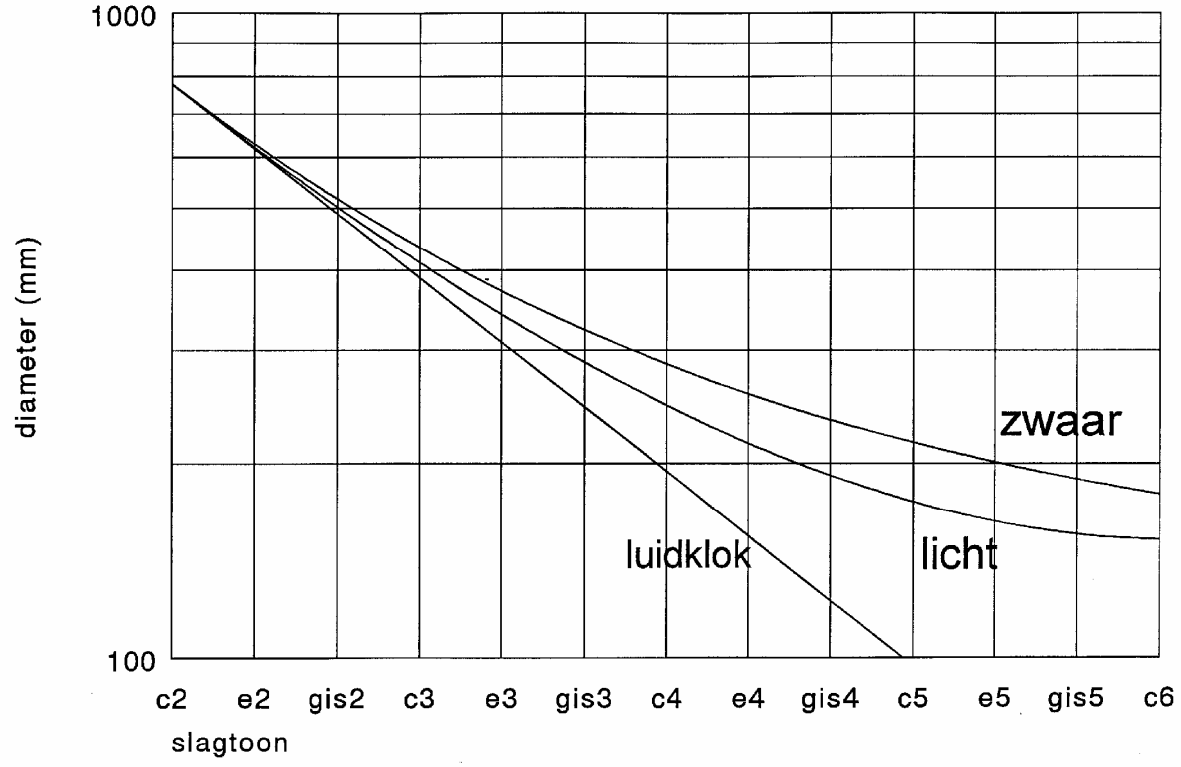
De conclusie uit het vorengaande ligt thans wel voor de hand. Naarmate de speelklok hoger van toon wordt, moet meer en meer van de luidklokkenafmetingen afgeweken worden, dus de toepassing van het principe van dynamische gelijkvormigheid. In figuur 43 is dat aanschouwelijk uitgebeeld. Op de horizontale as zijn de slagtonen genoteerd, op de verticale de diameters. De lijn van de luidklokken loopt tot c^5, waarbij vanzelfsprekend de opmerking gemaakt moet worden dat zulke hoge luidklokjes niet bestaan. Een toonhoogte van e^3 is wel het maximum. De twee andere lijnen geven mogelijke afmetingen voor speelklokken. Een eerste conclusie daarbij is dat tot en met d^2 de afmetingen en gewichten van speelklokken identiek zijn aan die van luidklokken. Pas daarna worden speelklokken naar verhouding groter en dus zwaarder. De praktijk heeft daarbij tot twee gewichtstypen geleid, namelijk relatief lichte speelklokken die vooral op historische voorbeelden zijn gebaseerd en zware die vooral in de jaren vijftig en zestig van de vorige eeuw voorstanders kenden. Men bedenke overigens dat die lijnen niet berekend werden, doch door een vrije keuze op basis van ervaring tot stand zijn gekomen. Vandaar ook twee verschillende mogelijkheden. Lichte beiaardklokken die vooral bij kleine beiaarden in lage torens van toepassing zijn en zware speelklokken welke in de eerste plaats voor omvangrijke concertbeiaarden in hoge torens aantrekkelijk zijn. Die gewichten vindt men in figuur 44.

In de hierna te geven tabel voor beiaardklokken zijn meer nauwkeurige waarden voor de diameters genoteerd, waarden zoals die in werkelijkheid eveneens gehanteerd worden. Bovendien is telkenmale het gewicht der klok zonder kroon gegeven. Ze zijn berekend aan de hand van een formule die hier niet verder bewezen zal worden. Deze luidt:

$$M = c.f.D^4$$

Hierin is M het gewicht zonder kroon in kg, f de frequentie van de grondtoon en D de doorsnede in meters. De constante c tenslotte hangt af van het gebezigde profiel. Bij de onderhavige berekeningen bedroeg c = 2,8 kg.sec/m^4. Een a^1-klok met een grondtoon van 220 Hz en een doorsnede van 0,925 mm weegt derhalve 2,8 x 220 x 0,925^4 = 451 kg.

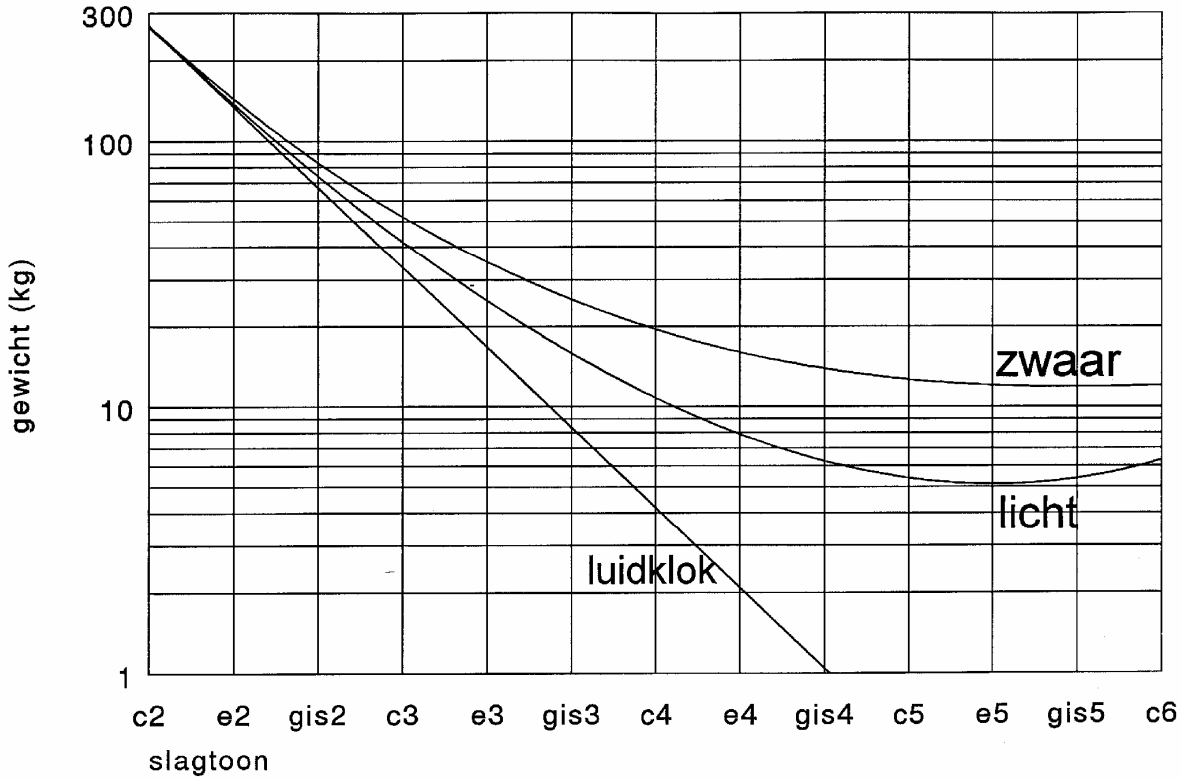
In dit verband moet op een hieraan gerelateerde grootheid gewezen worden, namelijk de zogenoemde *fD-waarde*, dat wil zeggen het product van de grondtoonfrequentie en de doorsnede in meters. Voor genoemde a^1-klok is de fD 220 x 0,925 = 203,5 m/s. De fD-waarde zegt iets over de wanddikte van een klok. Een a^3-klokje volgens luidklokkenprofiel heeft een fD van 880 x 0,231 = 203 m/s, dus afgezien van afrondingen dezelfde waarde als voor de a^1-klok. Dat lag ook voor de hand omdat luidklokken volgens het principe van de dynamische gelijkvormigheid gemaakt worden. Wordt bijvoorbeeld de frequentie verdubbeld, dan wordt de diameter gehalveerd zodat de fD niet verandert. Stel echter wij willen dat a^3-klokje een diameter van 276 mm volgens het zwaar profiel geven, dus een dikkere wand. Dan is fD gelijk aan 880 x 0,276 = 242,9 m/s. Blijkbaar is de fD-waarde een maat voor de wanddikte van een klok. Voor zware beiaardprofielen kan die voor de c^6 wel oplopen tot rond 750 m/s, bij lichte profielen tot ruim 600 m/s.



Figuur 43: Diameters (mm) vanaf c^2 voor luidklokken alsmede lichte en zware beiaardklokken.

Uit 4.7 zal men zich de uitspraak herinneren dat het normale profiel niet verder gewijzigd mag worden dan tot over een hele toon lager of hoger, althans indien de toonstructuur behouden moet blijven. Bij speelklokken wordt echter duidelijk anders gehandeld. Het eerder genoemde c^5-klokje bijvoorbeeld heeft bij zwaar profiel een diameter van 216 mm. Als luidklok uitgevoerd zou een klok met deze doorsnede als een bes^3 klinken, dus meer dan een octaaf verschil. Dat dit niettemin voor kleine speelklokken aanvaardbaar is, berust op de volgende overwegingen.

Zoals in 4.7 gesteld werd, kan het ideale klokakkoord in profielen die aanzienlijk van de normale afwijken onvoldoende verwezenlijkt worden. Weliswaar kan met enkele plaatselijke profielveranderingen iets ten goede gekeerd worden, doch nimmer volledig. Figuur 25 in 4.7 kan dit voor speelklokken op interessante wijze illustreren. Daaruit blijkt namelijk dat wanneer de klokkenwand verdikt wordt, een zo belangrijke partiaal als de priem achterblijft. In de discantklokken van een beiaard zouden dus te lage priemen gehoord worden. Gelukkig echter kan een te lage priem gecompenseerd worden door de hoogte van de klok te verminderen. Kleine speelklokken zijn derhalve niet alleen dikker dan normaal, doch bovendien ook lager. Ook kan men natuurlijk de kop van de klok dikker maken, waarmee de inwendige hoogte verminderd wordt zonder dat dit aan de buitenkant zichtbaar is. Het bezwaar van een dikke kop is echter dat de klok geremder kan klinken.



Figuur 44: Gewichten vanaf c^2 van luidklokken alsmede lichte en zware beiaardklokken.

Wat bij de priem mogelijk is, geldt echter in veel mindere mate voor andere partialen. De kwint-boventoon zal door de wandverdikking gekoppeld aan hoogtevermindering altijd te hoog blijven, terwijl bij de partialen boven het octaaf 1-4 allerlei andere afwijkingen kunnen optreden. Dit alles is echter niet bezwaarlijk. Want het gaat hier om hoog klinkende klokken waarvoor het gehoor minder gevoelig is dan voor lagere. De hogere boventonen mogen derhalve wel iets afwijken, terwijl de kwint-boventoon, die een knoopparallel in het gebied van de slagring heeft, bij deze hoog klinkende klokken helemaal niet meer gehoord wordt. Dikwijls gaat een te hoge kwint in de kleinste klokjes bovendien gepaard met een te lage kleine terts, terwijl bij de allerhoogste zelfs het octaaf niet meer in de hand is te houden. Maar bezwaren daartegen worden minder steekhoudend naarmate de slagtoon hoger wordt. Klokjes in het vijf-gestreept octaaf bezitten dan ook heel wat afwijkingen!

Met betrekking tot de inwendige stemming bij hoog klinkende speelklokken zijn er dus nauwelijks bezwaren aan te voeren tegen een relatieve wandverdikking. Minder gunstig lijkt dit bij de uitklinktijden. Het blijkt namelijk dat hoe dikker de wand, hoe korter de uitklinktijd wordt. Maar gelukkig wordt dat gecompenseerd door het feit dat bij een dikkere wand de klok groter moet zijn en daardoor weer een langere uitklinktijd krijgt. Of om een voorbeeld te geven, elk c^5-klokje klinkt zo'n tien seconden na, ongeacht zijn afmeting. Maar, het zij voor alle zekerheid nogmaals opgemerkt, deze klokjes moeten dan wel van goed klokkenbrons met een hoog tingehalte op uitstekende wijze gegoten worden.

slagtoon	**licht profiel**		**zwaar profiel**	
	diameter (mm)	**gew. z.kr. (kg)**	**diameter (mm)**	**gew. z.kr. (kg)**
Diameters en gewichten zijn tot c^2 voor luid- en beiaardklokken hetzelfde. Zie 5.1.				
c^2	778	268	778	268
cis^2	734	225	735	226
d^2	693	190	697	194
dis^2	655	160	662	167
e^2	621	137	629	144
f^2	589	118	599	126
fis^2	559	101	570	109
g^2	530	87	544	96
gis^2	503	74	519	84
a^2	478	64	495	74
ais^2	455	56	474	66
b^2	432	48	453	58
c^3	412	42	434	52
cis^3	392	37	417	47
d^3	374	32	400	42
dis^3	357	28	385	38
e^3	341	25	370	35
f^3	326	22	357	32
fis^3	312	20	345	29
g^3	299	17½	333	27

gis^3	287	16	322	25
a^3	276	14½	312	23
ais^3	265	13	303	22
b^3	255	11½	294	21
c^4	246	10½	286	20
cis^4	238	10	278	18½
d^4	230	9	270	17½
dis^4	222	8½	264	17
e^4	215	8	257	16
f^4	209	7½	251	15½
fis^4	203	7	245	15
g^4	197	6½	240	14½
gis^4	192	6½	234	14
a^4	187	6	229	13½
ais^4	182	5½	225	13½
b^4	178	5½	220	13
c^5	175	5½	216	13
cis^5	171	5	212	12½
d^5	168	5	208	12½
dis^5	165	5	204	12
e^5	162	5	201	12
f^5	160	5	197	12
fis^5	158	5	194	11½
g^5	156	5	191	11½
gis^5	155	5½	189	12
a^5	154	5½	186	12
ais^5	153	5½	184	12
b^5	153	6	182	12
c^6	153	5½	180	12½
Afmetingen en gewichten van beiaardklokken.				

7.3 Speelklokken en toonstelsels

Dankzij de bijzondere kenmerken van elke stemming is het betrekkelijk gemakkelijk om vast te stellen of een orgel in de evenredig zwevende stemming dan wel middentoon-stemming staat. In het eerste geval zullen namelijk alle kwinten en grote tertsen evenredig zweven. In 5.3. gaven wij bijvoorbeeld de drieklank c-e-g waarvan c-e een zweving geeft van 5,29 Hz en c-g van 0,45 Hz. Indien men dit akkoord een octaaf hoger plaatst, dus c^1-e^1-g^1, zijn die getallen respectievelijk 10,58 en 0,90 Hz. Bij elke octaafverhoging verdubbelt derhalve de zwevingsfrequentie. Deze rekenwijze geldt natuurlijk ook voor kleinere intervallen waarbij de frequentieverhoudingen uit de tabel van 5.1 gehanteerd dienen te worden. Het akkoord d^l-fis^l-a^l zal derhalve zwevingsfrequenties bezitten van resp. 2 x 1,122 x 5,29 = 11,87 Hz en 2 x 1,122 x 0,45 = 1,01 Hz. Of meer in het algemeen gezegd, uitgaande van de zwevingen in het

akkoord c-e-g, zullen bij achtereenvolgende transposities van dat akkoord met telkens een halve toon, de zwevingen iedere keer met een factor 1,059 toenemen. Die factor is immers de frequentieverhouding van elke halve toon in de evenredig zwevende stemming.

De situatie bij de middentoonstemming ligt voor instrumenten met harmonische boventonen duidelijk anders. Daarin immers wordt de zwevingsfrequentie, zo die al aanwezig is, mede bepaald door het interval dat de grondtoon van het akkoord met de basis van de middentoonstemming maakt. Men denke bijvoorbeeld alleen al aan de wolfskwint gis – es^{1} die aanzienlijk sneller zweeft dan alle andere, echte kwinten. Maar ook voor de grote tertsen geldt iets dergelijks. Die op c, d, es, e, f, g, a en bes zullen volkomen zwevingsvrij zijn, maar die op cis, fis, gis en b, welke in feite verminderde kwarten zijn, zullen duidelijk zweven. Immers, de harmonische boventoon grote terts eis van cis maakt een interval van 386 cents met de cis. De verminderde kwart cis - f daarentegen 428 cents. Vandaar dat de boventoon eis^{2} van de cis-pijp gaat zweven met de boventoon f^{2} van de f-pijp.

Uit het bovenstaande volgt dat bij zorgvuldig beluisteren van genoemde tertsen en kwinten het gemakkelijk moet zijn om vast te stellen of een orgel in de middentoonstemming staat. Het middentoonorgel heeft een wolfskwint en een aantal juiste en onjuiste grote tertsen die zich kenbaar maken door al of niet te zweven. Het orgel in de hedendaagse stemming daarentegen kent geen bepaalde intervallen die niet zweven dan wel aanzienlijk meer dan de andere.

Gezien de totaal andere boventoonstructuur van klokken kan het vorengaande niet op beiaarden worden toegepast. Wil men derhalve vaststellen of een carillon in de middentoonstemming is uitgevoerd, dan zal men andere wegen moeten inslaan. Hierbij zal men gebruik moeten maken van de kleine terts-partialen. De grondtoon, priem en het octaaf zijn in dit opzicht van geen belang, terwijl de kwint-boventoon te zwak is.

Met behulp van het overzicht in 5.2 kan men gemakkelijk vaststellen dat de kleine tertsen op es, f en bes in de middentoonstemming onjuist zijn (268½ cents), terwijl alle overige goed zijn (310½ cents). Beslissend voor de vraag hoe de beiaard hierop reageert, is vanzelfsprekend de ligging van de kleine terts-partiaal. Zoals in 4.8 reeds vermeld werd, is de terts-partiaal gewoonlijk aan de hoge kant (310-320 cents). Dit betekent dat de onjuiste kleine tertsen (268½ cents) aanzienlijk sneller zullen zweven dan de juiste (310½ cents). Aldus is het heel gemakkelijk om vast te stellen of een beiaard op de juiste wijze in de middentoonstemming is aangesloten.

7.4 Hoe nauwkeurig moet een beiaard gestemd worden?

Omdat de boventonen van een klok in tegenstelling met die van orgelpijp geen vaste ligging kennen, dient de vraag gesteld te worden aan welke nauwkeurigheid deze moeten voldoen. Het doel daarbij is dat de gewenste stemming, bijvoorbeeld de middentoonstemming, zowel voor de inwendige stemming (partialen onderling) als de uitwendige stemming (klokken onderling), zodanig gerealiseerd wordt dat, in analogie met een orgel, zwevingen tot een minimum zijn teruggebracht. In het volgende overzicht hebben wij dit probleem aanschouwelijk trachten voor te stellen. Bij het samenstellen van die matrix werd de vraag gesteld welke partialen van klokken in een vier octaafs beiaard op c^{1} zullen samenvallen met de grondtoon, priem, kleine terts en het octaaf van de c^{3}-klok. Men ziet dat hier maar liefst negen klokken

bij betrokken zijn, waarbij naast octaafrelaties vanzelfsprekend de kleine terts en zijn omkering de grote sext voorkomen. Het zijn de klokken met slagtonen c^1, a^1, c^2, es^2, a^2, es^3, a^3, c^4 en es^4. Hun partialen zijn telkens in een rij genoteerd. In de middelste rij staat de c^3-klok waarvan een partiaal met meerdere klokken uit gegeven reeks kan zweven.

Een beiaard stemmen is derhalve geen sinecure. Men kan beslist niet volstaan met aan te geven in welke stemming een carillon gemaakt moet worden en vervolgens deze met inachtneming van vooraf vastgestelde toleranties voor individuele klokken te realiseren. Want wanneer bijvoorbeeld de grondtoon c^2 van de c^3-klok twee cents te laag is, dan is dat op zichzelf beschouwd geheel aanvaardbaar. Maar indien de priem c^2 van de c^2-klok drie cents te hoog blijft, dan moge dat wederom op zichzelf beschouwd aanvaardbaar zijn, doch in samenklank met de c^2-klok allerminst. Een verschil van vijf cents geeft namelijk in de omgeving van c^2 een zwevingsfrequentie van 1½ Hz. Met dit alles dient men dan ook de norm te hanteren dat wanneer één van de c^2-partialen te laag is, de andere dit ook moet zijn, waarbij onderlinge afwijkingen van maximaal enkele cents nog toelaatbaar blijven. Vanzelfsprekend geldt deze regel niet alleen voor octaaftonen maar ook voor andere samenvallende partialen.

c		c^1	es^1		**c^2**												
	a			a^1	**c^2**												
		c^1			**c^2**	es^2			**c^3**								
			es^1			es^2	ges^2			**es^3**							
				a^1				a^2	**c^3**			a^3					
					c^2				**c^3**	**es^3**			**c^4**				
						es^2				**es^3**	ges^3			es^4			
								a^2				a^3	**c^4**			a^4	
									c^3				**c^4**	es^4			
										es^3				es^4	ges^4		
													c^4				c^5

De tabel maakt ook duidelijk dat de in- en uitwendige stemming van de klokken dezelfde moeten zijn. Mag men bijvoorbeeld van een luidklok wel aanvaarden dat die inwendige stemming niet geheel correct is, bij een speelklok kan dit tot ernstige zwevingen leiden. Stel men heeft de octaaftonen van een es^2 en een c^3 juist gestemd, doch de kleine terts-partialen min of meer aan hun lot overgelaten onder het motto dat deze toch geen bijdrage leveren aan de ondubbelzinnigheid van de slagtonen. Zodra echter beide klokken samenklinken zal de octaaf-partiaal es^3 van de es^2-klok gaan zweven met de kleine terts-partiaal es^3 van de c^3-klok.

Het vorenstaande probleem kan nog overtuigender geïllustreerd worden met het verminderd septiem-akkoord. In beiaarden die gestemd zijn in de evenredig zwevende stemming kan dit akkoord vanzelfsprekend op elke willekeurige toon gevormd worden, in spelen die in de middentoonstemming zijn gemaakt, slechts op drie tonen. Bij deze is mogelijk: cis-e-g-bes, fis-a-c^1-es^1 en gis-b-d^1-f^1. Stel wij laten dit akkoord, zo specifiek voor een carillon, over twee octaven klinken. Elke klok ontleedt in haar belangrijkste boventonen leidt dan tot het beeld wat in het navolgende schema geschetst is. Duidelijk is te zien hoezeer elke klok aan de andere gekoppeld is en hoe weinig zin het heeft een stemmingsnorm uitsluitend voor de individuele speelklok op te stellen. Beter kan men eisen dat de partialen grondtoon, priem, kleine terts

en octaaf onderling en ten opzichte van partialen in andere klokken niet meer dan twee cents naar beneden of naar boven mogen afwijken, zij het met de uitdrukkelijke restrictie dat daarmee partialen uit verschillende klokken die op gelijke toonhoogte liggen, niet storend gaan zweven. Sommige musici vinden dit eigenlijk te zwak geformuleerd en eisen dat géén zwevingen gehoord mogen worden. Vanzelfsprekend speelt in deze verdere verfijning uitsluitend de artistieke smaak nog een rol Anderen immers waarderen juist enkele matige zwevingen.

cis				cis^1	e^1			cis^2								
	e				e^1	g^1			e^2							
		g				g^1	bes^1			g^2						
			bes				bes^1	des^2			bes^2					
				cis^1				cis^2	e^2			cis^3				
					e^1				e^2	g^2			e^3			
						g^1				g^2	bes^2			g^3		
							bes^1				bes^2	des^3			bes^3	
								cis^2				cis^3	e^3			cis^4

Toch blijft het zelfs met deze meer genuanceerde regel gevaarlijk er blindelings mee te werken. Wanneer bijvoorbeeld de grondtoon van de bes^1-klok uit het overzicht tien cents te laag zou zijn, dan kan dit naar de letter weliswaar onjuist zijn. doch anderzijds weet men maar al te goed dat die lage grondtoon geen gelegenheid krijgt om met andere tonen te zweven. Bij nog lager klinkende klokken speelt bovendien de verminderde gehoorgevoeligheid een rol. Enige soepelheid, gecontroleerd door het muzikale gehoor, is dan ook allerminst een schande. Soepelheid teneinde gebrek aan vakmanschap te maskeren is natuurlijk nimmer te aanvaarden. In dezelfde orde ligt de behandeling van de kwint-boventoon en partialen boven het octaaf.

Wanneer wij thans nog even terugkeren tot het verminderd septiem-akkoord uit de tabel, dan zal opvallen dat de bes-klokken een des en geen cis als kleine terts-boventoon bezitten. In de evenredig zwevende stemming waarin cis en des per definitie aan elkaar gelijk zijn, kan dit geen problemen geven, in de middentoonstemming daarentegen wel. Het betekent dat wanneer de klokken één voor één worden aangeslagen, bij de overgang van het ene octaaf naar het andere, dus wanneer bes en cis na elkaar klinken, zwevingen gehoord worden. Men zou daarom kunnen eisen dat de terts van de verminderde septiem-klok op een overmatige secunde gestemd moet worden. Het lijkt aantrekkelijk, doch men dient zich dan wel te realiseren dat aldus de klankkleur van de klok met de zoveel lagere terts anders zal zijn dan van de overige klokken. Met het oog op dat gevaar van een andere klankkleur zorgt de stemmer er overigens voor dat de kleine tertsen in de meeste klokken wel ongeveer juist zijn en zo ze afwijken, doorgaans aan de hoge kant zijn. Daarom kan men zonder gevaar voor verkeerde conclusies met behulp van de kleine terts-boventoon vaststellen of een beiaard in de middentoonstemming staat (7.3).

Een laatste praktische vraag blijft tenslotte te beantwoorden. Heeft het namelijk wel enige zin om een klokkenspel in de middentoonstemming te vervaardigen? Met betrekking tot het gebruik in het verleden weten wij, dat de middentoonstemming in de zeventiende en achttiende eeuw allerwegen voor beiaarden werd toegepast. In de jaren vijftig van de vorige eeuw toen het stemmingsprobleem zeer actueel was, zijn nog enkele klokkenspelen in de midden-

toonstemming gemaakt, overigens ook een enkele in de pythagoreïsche stemming. In deze stemming worden alle tonen opgebouwd in een kwintencirkel met reine kwinten met een verhouding van 3/2 wat gelijk staat met 702 cents. Deze stemming werd in de middeleeuwen gebruikt maar daarna nooit meer.

Het beiaardklavier dat in 10.6 besproken wordt, maakt het begrijpelijk dat het speeltechnisch een vrij moeilijke zaak is om in ver verwijderde toonsoorten te spelen, dus met veel chromatische tonen. Volgens sommige musici mag men daarom stellen dat het klavier als het ware een beperking in de keuze van de toonaarden oplegt die dezelfde is welke de middentoonstemming voorschrijft. Daarom, zo zou men kunnen redeneren, is het helemaal niet bezwaarlijk dat niet in E-groot en in B-groot enz. gespeeld mag worden. Speeltechnisch kan het toch niet op een carillon. Hoe redelijk dit ook klinkt en hoe aanvaardbaar het ook is voor eenvoudige wijsjes en melodieën, de redenering is principieel onjuist. Alle muziek sinds Bach is namelijk gecomponeerd met de wetenschap dat alle halve tonen aan elkaar gelijk zijn. Strikt genomen mag dan ook geen enkele compositie sindsdien op een middentoonbeiaard ten gehore worden gebracht.

Er is een beperkt aantal musici die een dergelijk betoog wel kan onderschrijven, doch anderzijds staande houdt, dat een beiaard niet bedoeld is voor moderne toondichtingen waarop bovenstaande beschouwing in de eerste plaats van toepassing is. Daarom, zo zeggen zij, indien met andere stemmingen meer klankschoonheid verkregen wordt, mag men dat zeker niet nalaten. Het is echter maar de vraag of een dergelijke redenering juist is. Ruwweg zou men namelijk kunnen betogen dat, waar de klokkengieter zowel in de inwendige als uitwendige stemming actief kan ingrijpen, het voldoende is dat samenvallende partialen niet zullen zweven. Wat doet het er dan nog toe wanneer de terts niet 300 of 310½ cents meet, doch slechts 290? Immers, wanneer die waarde zowel aan de inwendige als uitwendige terts-relatie wordt gegeven, kan van dissonantie geen sprake zijn.

Blijft dan over de vraag hoe het muzikale gehoor reageert op een kleine terts van 290 of van 310½ cents die in geen van beide gevallen behoeft te zweven. Speelt dan de absolute grootte van het interval een rol? Sommige musici zeggen van ja, ofschoon enig bewijs daarvoor ontbreekt. Men verwijst dan weliswaar naar de reine stemming doch verzuimt daaraan toe te voegen dat die stemming op instrumenten met harmonische boventonen is gebaseerd. En die ontbreken ten enenmale in de klokkenklank.

8 DE TRACTUUR VAN DE SLAGKLOK

8.1 De ophanging van de klok

Het zou een misverstand zijn te menen dat met een juiste keuze van de klok en bijbehorende klepel of hamer aan alle klanktechnische eisen is voldaan. Zeker, zonder klok en klepel zal geen klank gehoord worden. Niettemin is het evenzeer waar dat er tal van factoren zijn die slechts zijdelings met die klok en haar klepel te maken hebben, maar toch de klokkenklank kunnen beïnvloeden.

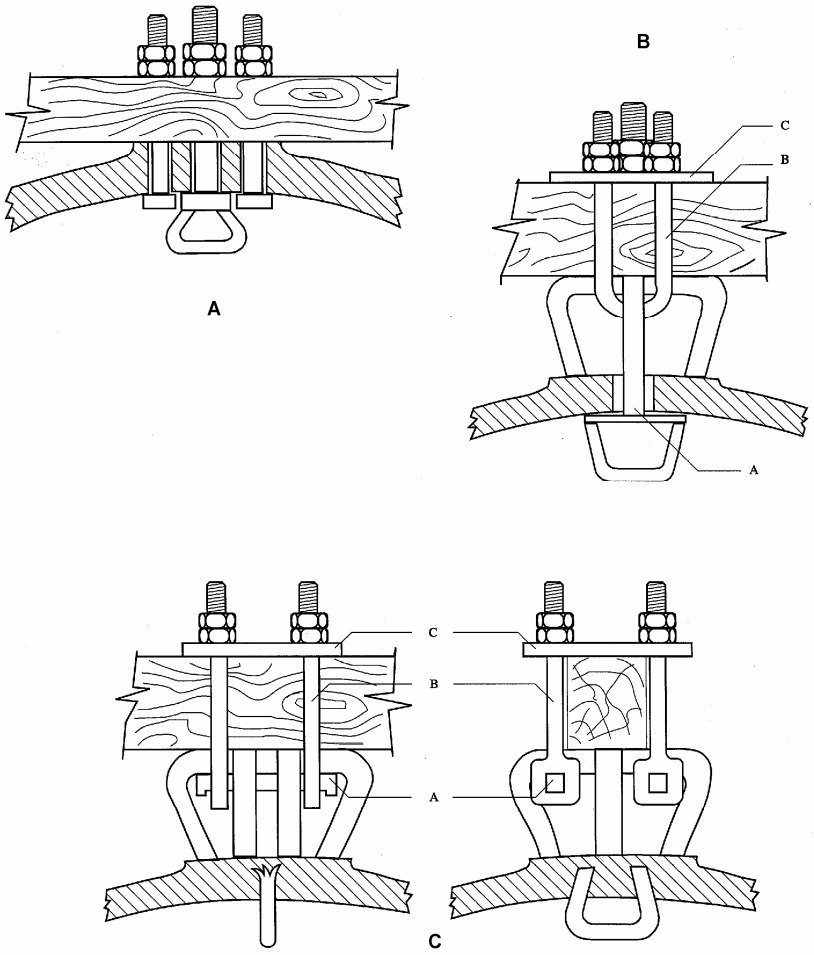
De klok moet opgehangen worden. De ervaring heeft bij herhaling geleerd dat die ophanging niet willekeurig gekozen mag worden. Zo blijkt bijvoorbeeld dat wanneer een relatief kleine klok aan een betrekkelijk zware ijzeren balk op hechte wijze bevestigd wordt, de aanslag een geremde indruk zal maken en bovendien ontsierd kan worden door meetrillend ijzer.

De oorzaak van het boven beschreven verschijnsel moet teruggebracht worden tot het feit dat de partialen niet eerder dan in het centrum van de kop der klok géén trillingen meer uitvoeren. Aldaar bevindt zich dus een knoop. Onmiddellijk daarbuiten zijn altijd wandbewegingen te constateren. Deze zijn overigens buitengewoon gering, ja zó gering zelfs dat ze in de trillingsfiguren van figuur 16 in 4.3 niet meer geschetst konden worden. Maar anderzijds kunnen ze wél afgeremd worden, met alle negatieve gevolgen van dien voor de klokkenklank.

Een dergelijke demping schijnt in wezen vrijwel onvermijdelijk. Immers, het aanrakingsoppervlak tussen klok en ophangbalk kan nimmer tot een punt gereduceerd worden en bezit dus altijd enige uitgebreidheid. Om die reden wordt tussen de klok en de balk, althans wanneer die niet uit hout is vervaardigd, een akoestische isolatie aangebracht. Voor grotere klokken bestaat die uit een vierkante houten plank, voor kleinere uit rubber, leer of kunststof. Het grote voordeel van een dergelijke isolatie bestaat wel hieruit dat de klok, en zeker een kleinere, een min of meer elastische bevestiging heeft gekregen waardoor de demping van de koptrillingen tot een minimum wordt beperkt. Wordt dit bovendien gecombineerd met een niet te vast aandraaien van de ophangbouten, en dat wederom voor kleinere klokken in het bijzonder, dan heeft men optimale voorwaarden geschapen voor een zo ongeremd mogelijke en daarom mooie en natuurlijke klokkenklank.

Genoemde elastische bevestiging heeft nog een tweede voordeel. Het tussenliggende hout of rubber zal het directe contact tussen klok en balk tot een minimum beperken. Het sterk dempende hout of leer kan namelijk de klepelslag slechts in zeer beperkte mate naar de balk doorlaten, De gelukkige consequentie daarvan is dat het ijzer niet of nauwelijks zal gaan meeklinken. Overigens geldt ook hier weer dat dit vooral voor de kleinste klokken van het hoogste belang kan zijn. Vooral bij discantklokken van een beiaard mag dit aspect niet veronachtzaamd worden!

Bovenstaande aanbevelingen gelden in de eerste plaats voor ophangbalken uit constructie-ijzer en massieve balken (stafijzer). Anders is dat echter bij ijzeren kokerbalken. Deze immers vormen door hun holle structuur een ideale resonantiekast met alle nare gevolgen van dien, zoals storende bijgeluiden tijdens de aanslag van de klok. Kokerbalken dienen dan ook vermeden te worden!



Figuur 45: Verschillende ophangmogelijkheden.

Met betrekking tot de bevestiging zelf hebben wij in figuur 45 enkele voorbeelden voor een houten balk gegeven. Tekening A toont het meest eenvoudige geval van een klok zonder kroon. In de flens die gewoonlijk een kwart van de klokdoorsnede is, zijn namelijk enkele gaten geboord waar doorheen bouten gestoken kunnen worden. Vanzelfsprekend is de dikte van die bouten en hun aantal afhankelijk van de grootte van de desbetreffende klok. De middenbout is natuurlijk altijd aanwezig. Daaraan namelijk wordt het oog bevestigd waarin de klepel kan hangen.
Tekening B geeft een klok met kroon en wel in een uitvoering waarbij niettemin een middenbout A gebruikt kan worden. Voorts is aan de voor- en achterzijde van de balk telkenmale door een kroonarm een ijzeren strop aangebracht. Boven de balk komen derhalve vijf bouten uit die door middel van een voorgeboorde ijzeren plaat C in de juiste positie worden gehouden. Moeren en contramoeren tenslotte zorgen voor een definitieve bevestiging.

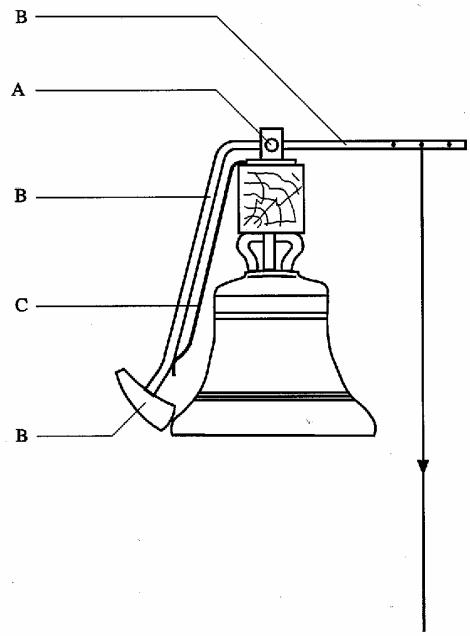
In C tenslotte is de moest gecompliceerde ophanging getekend. Men ziet dat de klok een ingegoten klepeloog heeft en derhalve geen middengat bezit. Om die reden wordt ze aan twee maal twee kroonarmen opgehangen, Door twee armen wordt namelijk een ijzeren staaf A gestoken. Om elk einde wordt een strop met een oog B gelegd. Boven de balk komen derhalve vier bouten uit die door middel van plaat C weer in de juiste positie worden gehouden. Moeren en contramoeren doen de rest.

Tot besluit is het wellicht goed om op te merken dat een nieuw opgehangen klok aan een houten balk zeker in de eerste jaren op hechtheid van bevestiging gecontroleerd moet worden. Hout immers blijft voortdurend werken waardoor bouten en moeren regelmatig bijgesteld moeten worden. Daarom ook is het te begrijpen dat vele technici hun voorkeur voor ijzeren ophangbalken niet onder stoelen of banken steken.

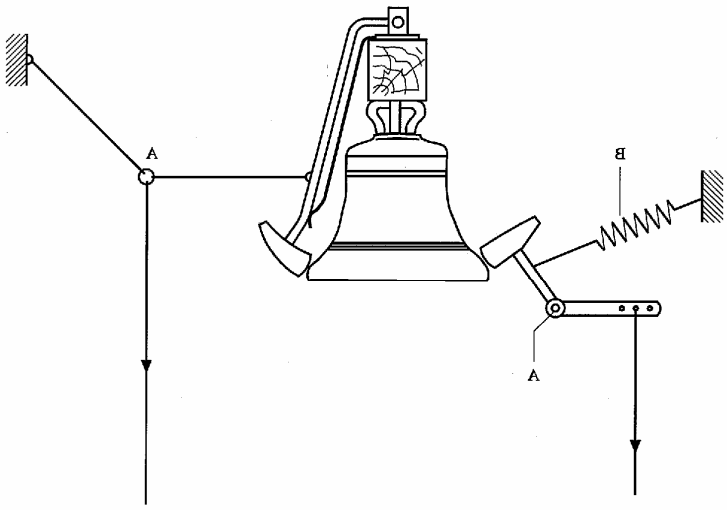
8.2 De tractuur van de slagklok

Wanneer een klok uitsluitend dienst moet doen als slagklok hangt ze onbeweeglijk aan de balk. Nochtans is ook een combinatie van luidklok met slagklok mogelijk. Voor het verdere betoog gaan wij er echter vanuit dat het hier uitsluitend om een stilhangende klok gaat.

In vrijwel alle gevallen is de slagklok als uurklok of halfuurklok in gebruik. Haar afmetingen kunnen ver uiteen lopen. Zo zijn slagklokken van 2000 kg en méér beslist geen uitzondering, terwijl exemplaren van nauwelijks 50 kg evenmin tot de zeldzaamheden behoren. Het gemeenschappelijk kenmerk is dat op deze klokken vanuit een uurwerk door middel van een hamer de volle en de halve uren geteld worden. In figuur 46 en 47 zijn de daarvoor noodzakelijke mechanische voorzieningen getekend. Figuur 46 toont een stilhangende klok aan een houten balk. Bovenop die houten balk is een draaipunt A aangebracht waarin de steel van hamer B kan draaien. Wordt derhalve de staaldraad volgens de aangegeven richting naar beneden getrokken, dan zal de hamer omhoog gelicht worden. Laat vervolgens het slagwerkmechaniek van het uurwerk de draad weer vrij, dan zal de hamer terugvallen en de klok aanslaan. Zonder een extra voorziening zou de hamer echter tegen de klok blijven rusten en de klank derhalve afremmen. Een lange stalen veer C die onder de hamersteel ligt, zorgt er daarom voor dat de hamer direct na de aanslag weer van de klokkenwand vrijkomt. Het zal overigens duidelijk zijn dat de sterkte van die veer zodanig moet zijn dat de hamer er doorheen kan vallen zodat de klok aangeslagen kan worden.



Figuur 46: Slaghamer met overstekende steel.



Figuur 47: Slaghamer met broekverbinding en met trekveer

Vanzelfsprekend mag voor de afstand waarover de hamer naar de klok valt geen willekeurige waarde genomen worden. Een te lange afstand zou een zeer felle aanslag geven, een te korte zou de klok onhoorbaar maken. De praktijk leert dat voor een klok van circa 500 kg en bij niet te straf afgestelde veer een afstand van enkele centimeters voldoende is. Het zal daarbij natuurlijk duidelijk zijn dat hoe sterker de veer is, hoe hoger de hamer dient te vallen teneinde hetzelfde effect te kunnen bereiken. Die afstand op zijn beurt kan enerzijds in het uurwerk ingesteld worden en anderzijds door middel van het bevestigingspunt van de staaldraad aan de horizontale arm van de hamersteel. Hoe dichter immers dat punt naar het draaipunt wordt gebracht, hoe groter de afstand is waarover de hamer zal vallen.

In figuur 47 zijn nog twee gebruikelijke varianten gegeven. De rechter hamer toont de zogenoemde broekverbinding die in 10.2. uitvoeriger aan de orde zal komen. De werking is gemakkelijk te doorzien. Aan een ring A zijn drie staaldraden bevestigd. Een ervan gaat naar een vast punt aan de muur (broekdraad), de volgende naar de hamersteel (hamerdraad) en de laatste tenslotte naar het uurwerk (trekdraad). Wordt vervolgens door het uurwerk de draad naar beneden getrokken, dan zal de hamer van de klok gelicht worden.

Het linker deel van de schets toont een geheel andere manier van aanslaan. Hier wordt namelijk gebruik gemaakt van een zogenaamde tuimelaar, dat wil zeggen twee ijzeren armen die onder een hoek aan elkaar bevestigd zijn en op het hoekpunt kunnen draaien, een winkelhaak derhalve. Die uit figuur 47 heeft op een der armen een hamer. De werking is dan verder eenvoudig. De hamer draait om A terwijl een spiraalveer B ervoor zorgt dat de hamer niet tegen de klokkenwand blijft rusten.

Een laatste variant zij hier tenslotte slechts volledigheidshalve genoemd. In plaats van een puur mechanische hamer kan men namelijk ook een elektromagnetische kiezen. Hierbij zorgt de magneet ervoor dat, wanneer hij elektrisch bekrachtigd wordt, de hamer van de klok wordt getild dan wel dat de hamer naar de klok toe bewogen wordt. Op dit systeem wordt in 10.11 uitvoeriger ingegaan.

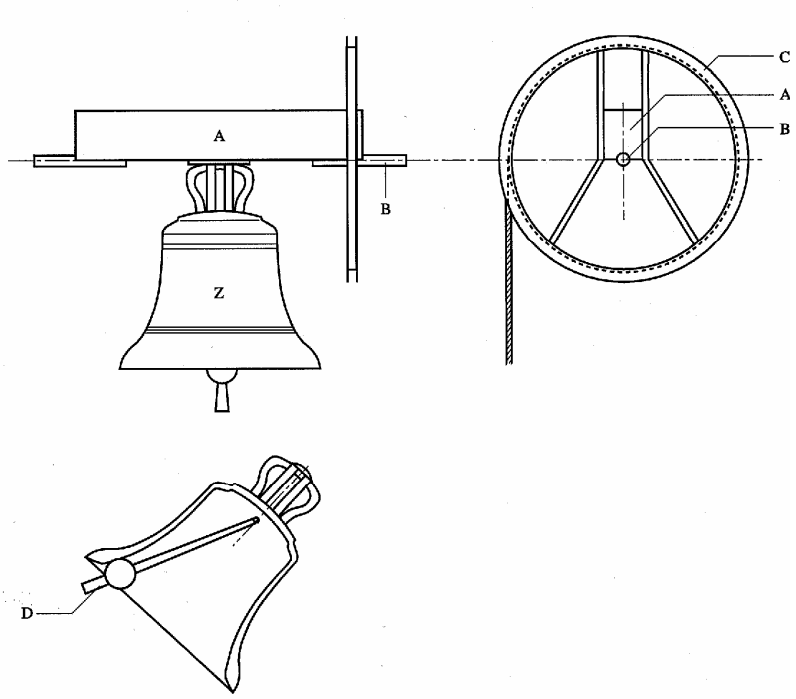
In het vorengaande hebben wij reeds enkele facetten genoemd die de klank kunnen beinvloeden. Onder andere is dat de afstand waarover de hamer naar de klok toe valt. Maar ook het gewicht en het materiaal waaruit de hamer vervaardigd worden, speelt natuurlijk een belangrijke rol. In feite gelden daarvoor dezelfde overwegingen die in 4.11 ontwikkeld werden. Een kleine kanttekening bij de slaghamer is derhalve voldoende. Gewoonlijk wordt zijn gewicht als uurhamer niet te laag gekozen, dus niet minder dan 4%. In de tweede plaats wordt doorgaans ijzer als materiaal gekozen met een hardheid van circa $H_b = 110$ kg/mm^2. Beide aspecten verenigd bewerkstelligen een krachtige uurslag.

Een stilhangende klok wordt vrijwel nooit van een klepel voorzien, althans wanneer ze geen deel uitmaakt van een beiaard. Om die reden zal de tractuur van de klepel bij de slagklok gelijktijdig met die van het klokkenspel behandeld worden (10.2 – 10.5).

9 DE TRACTUUR VAN DE LUIDKLOK

9.1 Typen luidassen

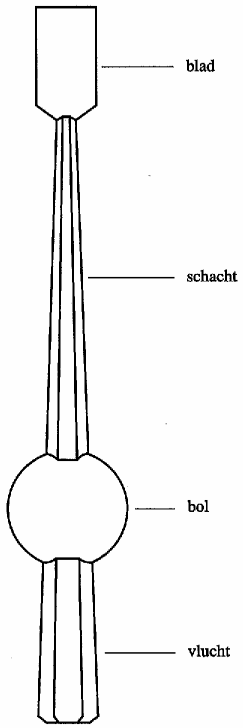
De meest eenvoudige manier om een klok te laten luiden is ongetwijfeld die welke in figuur 48 getekend is. Aan een rechte stalen of houten balk A wordt de klok gehangen en wel op de wijze zoals in 8.1 beschreven werd. Deze rechte luidbalk of *rechte luidas* heeft aan beide uiteinden een ijzeren astap B die in een kogellager kan draaien. Aldus is het mogelijk de klok heen en weer te laten schommelen, als een slinger in een uurwerk. De klokkenluider behoeft daartoe slechts op de juiste momenten aan het luidtouw te trekken dat om een luidwiel C is vastgemaakt.



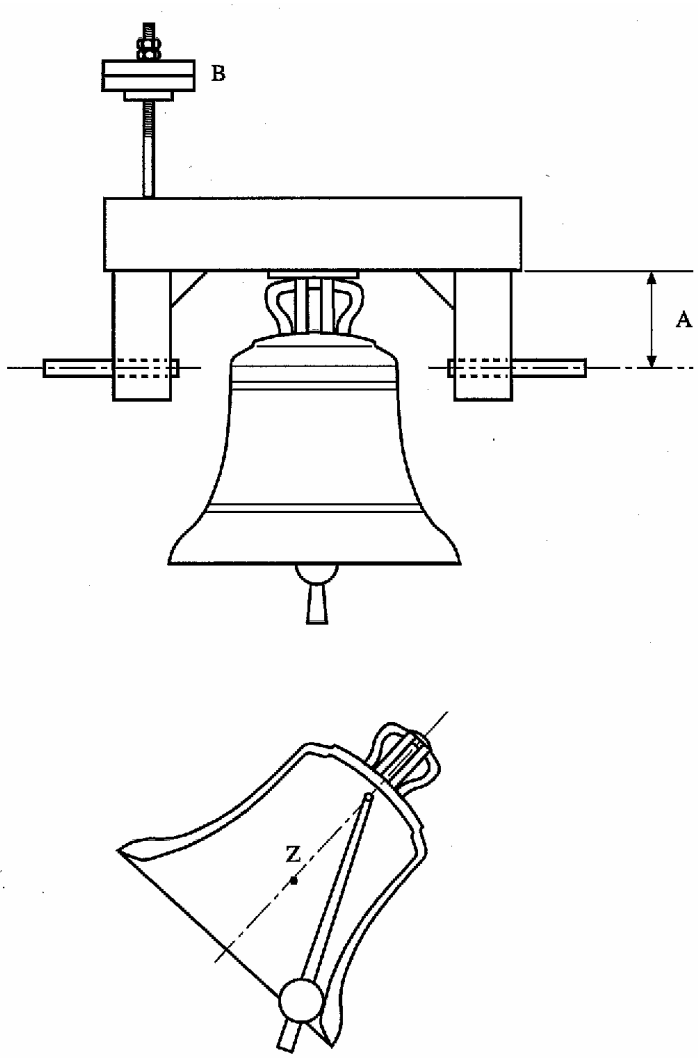
Figuur 48: Rechte luidas met vliegende klepel.

Een rechte luidas gaat steeds samen met een zogenoemde *vliegende klepel*. Dit laatste wil zeggen dat de klepel altijd iets achter is op de beweging van de klok. Aldus zal de klok in haar uiterste positie, die tot 90^0 en zelfs meer ten opzichte van de verticaal kan oplopen, geraakt worden zoals in figuur 48 is aangegeven. Wel is daarbij noodzakelijk dat het staartstuk D, de zogenoemde *vlucht*, van de klepel voldoende lang en zwaar is (fig.49). Is dat namelijk niet het geval dan zal de klepel weliswaar met de klok meebewegen, doch op het beslissende moment niet die zwaai kunnen maken om de klok op het hoogste punt te kunnen treffen.

De klepel zelf is doorgaans van smeedstaal gemaakt. Ook wordt wel voor de bol zelf mangaanmessing gekozen. In dat geval zal de klok wat warmer klinken; in het eerste geval gewoonlijk iets feller en soms ook rijker aan boventonen. Dit is de reden dat voor luidklokken gewoonlijk de voorkeur aan stalen klepels wordt gegeven.



Figuur 49: Luidkepel.



Figuur 50: Krukluidas met vallende klepel.

Het gewicht van de klepel is weer de gebruikelijke 4%, soms ook 3½%, al naar de opvattingen van de constructeur. Overigens moet daarbij opgemerkt worden dat dit gewicht over de gehele klepel verdeeld is, zij het natuurlijk met een concentratie in de bol zelf. De vorm van de klepel is doorgaans zoals in de tekening geschetst is, hoewel ook hierin afwijkingen, afhankelijk van persoonlijke smaak en inzicht, kunnen voorkomen.
Het moge duidelijk zijn dat een slingerende klok een grote hoeveelheid energie in zich heeft opgehoopt. Het komt onder meer tot uiting in de krachten die tijdens het luiden op de klokkenstoel, de toren enz. worden uitgeoefend. Men kan zich namelijk voorstellen dat de klok zich voortdurend als het ware uit haar lagers wil losrukken. De daarbij optredende horizontale kracht kan bij de hier besproken rechte as wel tot 1,5 maal het klokgewicht oplopen, hoog genoeg voor constructeurs om daar terdege rekening mee te houden. Die kracht treedt overigens niet in de uiterste luidpositie in. Bij een opluidhoek van 90^0 is dat ongeveer bij 60^0.

Indien men de horizontale kracht die tijdens het luiden optreedt, omlaag wil brengen, kan een oplossing gevonden worden in het type luidas dat in figuur 50 geschetst is. Opgemerkt zij dat het contragewicht B later aan de orde zal komen. De grondgedachte bij deze zogenoemde *krukluidas* is dat hoe dichter het draaipunt van de as naar het zwaartepunt Z van klok en luidas wordt gebracht, hoe geringer de reactiekrachten zullen zijn. Dit zwaartepunt ligt, afhankelijk van het type luidas, ten naaste bij op 0,4 maal de diameter van de klok boven het grondvlak (Z). Zou de draaiingsas daar doorheen lopen, dan zouden géén reactiekrachten optreden. Maar of een dergelijke klok nog luidt, is een geheel andere vraag.

Gewoonlijk wordt bij dit soort beschouwingen gerekend met de *onderzetting* A (fig.50). Dit is de afstand van het hart van de astap tot aan de onderkant van de luidbalk. Hoe groter dus de onderzetting, hoe kleiner de reactiekrachten. In de praktijk wordt voor de onder-

zetting een waarde gekozen die ligt tussen 0,25 en 0,45 van de klokdiameter. De maximale horizontale krachten liggen dan in de orde van grootte van de helft van het klokgewicht of minder. Een nog verdere wijziging van de onderzetting is nauwelijks mogelijk. Men kan namelijk niet ongelimiteerd de onderzetting vergroten zonder dat dit negatieve gevolgen heeft voor de klepelaanslag.

Het merkwaardige feit doet zich namelijk voor dat bij een krukluidas de klepel niet meer vliegend doch vallend is geworden. Dit wil zeggen dat de klepelbewegingen betrekkelijk gering zijn geworden en de klepel als het ware opgeschept wordt, telkens wanneer de klok haar uiterste positie heeft bereikt. Dit laatste is er overigens ook de oorzaak van dat de klok aan een krukas gewoonlijk niet zo hoog opgeluid kan worden als een klok aan een rechte as. Kan dit bij de laatste tot 90^0 en meer oplopen, bij eerstgenoemde schommelt die hoek tussen de 50^0 en 70^0. Genoemde consequentie wordt wel heel in het oog lopend bij een te grote onderzetting. In dat geval zal de klepel telkens abrupt van de ene naar de andere zijde vallen en gedurende de rest van de tijd tegen de klokkenwand blijven rusten. Dat dan van een sonoor en helder klokgeluid geen sprake kan zijn, zal bepaald niet gezegd behoeven te worden.

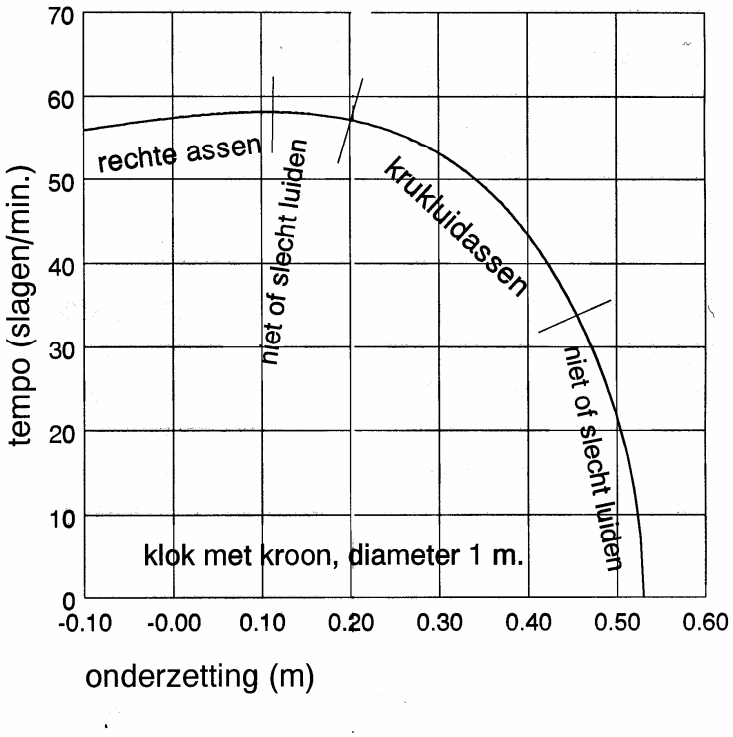
Wanneer de onderzetting zo groot wordt dat de draaiingsas ontoelaatbaar dicht bij het zwaartepunt van de klok komt, een bewering die in numerieke waarden in 9.2 nader uitgewerkt zal worden, zal de contacttijd tussen klok en klepel derhalve extreme waarden bereiken. Maar ook bij meer normale onderzettingen zal de contacttijd niet uit het oog verloren mogen worden. Niet voor niets dient bijvoorbeeld de vlucht van een vallende klepel veel lichter te zijn dan die van een vliegende. Toch blijkt het niet mogelijk om de contacttijden van beide assen aan elkaar gelijk te maken. De ervaring leert steeds weer dat de contacttijd tussen klok en klepel bij een vallende klepel groter is dan bij een vliegende. Al hetgeen hierover in 4.11 werd geschreven, is dan ook beslissend voor het verschil in klank tussen een klok aan een krukas en een rechte as. Bij het eerste zal de klank ietwat geremder, stugger en statischer zijn, terwijl bij de laatste een meer heldere, boventoonrijke en dynamische klank te horen is.

Uit het bovenstaande zou men de conclusie mogen trekken dat een vliegende klepel de voorkeur verdient boven een vallende. Toch blijkt men in de praktijk lang niet zo zwaar aan die klankverschillen te tillen als eigenlijk verwacht zou mogen worden. Anderzijds lijkt er toch van een kentering sprake te zijn. In Nederland en België wordt de rechte luidas bijvoorbeeld nauwelijks toegepast, in Duitsland daarentegen is het regel. Vanzelfsprekend wordt die voorkeur voor de krukas mede in de hand gewerkt door de lage reactiekrachten, een eigenschap die vooral bouwkundigen aanspreekt. Nochtans is er ook een andere aantrekkelijk argument om niet per se de voordelen van de rechte as te laten prevaleren. Een klok aan een krukas kan namelijk heel wat gemakkelijker in het luidtempo beïnvloed worden dan een klok aan een rechte as. En zoals wij zullen aantonen, ook een correct tempo kan bijdragen tot een aangenaam geheel, in het bijzonder wanneer het om een gelui, dus om meerdere klokken gaat.

Een laatste aspect is de kans dat tijdens het luiden de toren in resonantie raakt. Dat zal namelijk gebeuren wanneer bij een grote horizontale kracht de slingertijd van de klok en de toren samenvallen. Overigens is deze formulering niet helemaal correct omdat ook drie maal en vijf maal de slingerfrequentie van de luidende klok ook een rol spelen. Bij echte resonantie bestaat natuurlijk het gevaar dat de toren gaat scheuren met alle gevolgen van dien. Overigens behoeft men dit fenomeen niet lijdelijk af te wachten. De kans op resonantie kan heden ten dage vooraf berekend worden.

9.2 Aanslagtempo's

Men hoort wel eens de mening verdedigen dat de klokkenluider het tempo van aanslagen geheel naar eigen inzicht kan regelen en derhalve een strikt persoonlijke bijdrage kan leveren aan de schoonheid van een luidende klok. Op die wijze geformuleerd is dat echter onmogelijk. Zeker, de luider kan het tempo binnen zéér enge grenzen beïnvloeden, doch dan uitsluitend wanneer hij gebruik maakt van de natuurlijke eigenschappen van het luidsysteem. Van een dwingen in een richting die daarmee niet strookt, kan geen sprake zijn.



Figuur 51: De invloed van de onderzetting.

Onder het luidtempo van een klok verstaan wij het aantal aanslagen per minuut. Dit tempo blijkt afhankelijk te zijn, evenals de slingertijd van een slinger, van het gewicht en het massatraagheidsmoment (hier niet nader gedefinieerd) van de klok, de afstand van het zwaartepunt tot de draaiingsas en tenslotte de opluihoogte. Wat het laatste betreft, hoe hoger de klok opluidt, hoe lager het tempo zal zijn. De verschillen bedragen overigens slechts enkele procenten. Een klok bijvoorbeeld die in normale omstandigheden 60 aanslagen per minuut maakt, zal bij vergroting van de luidhoek een tempo van minimaal 58 kunnen krijgen.

Toch is juist bovenstaand verschijnsel er waarschijnlijk de oorzaak van dat het luiden met de hand de voorkeur geniet boven het luiden door middel van een motor, een elektrisch luidapparaat derhalve. Dat werkt namelijk zó regelmatig dat de opluihoogte vrijwel constant blijft en daarmee dus ook het tempo. De klokkenluider daarentegen kan vermoeid raken, waardoor de luidhoek gedurende enkele minuten wat kleiner wordt en daarmee het tempo hoger. Op geheel natuurlijke wijze wordt zodoende de monotonie bestreden. Daar komt overigens nog bij dat het timbre waarop de luisteraar de klank ervaart, afhankelijk is van die luidhoek. In 9.4 zullen wij daar nader op ingaan, mede in verband met het bim-bam effect.

Uit het bovenstaande blijkt wel dat, wil men het tempo regelen, dit reeds tijdens de constructie van de luidas gedaan moet worden, en met name met behulp van de afstand tussen zwaartepunt en draaiingsas of de daarvan afhankelijke onderzetting. In figuur 51 is bedoelde relatie gegeven voor een klok met een doorsnede van één meter en bij een gegeven type luidas. Uitdrukkelijk zij nog opgemerkt dat deze grafiek uitsluitend een oriënterende betekenis heeft. Lang niet alle luidassen voor klokken van een meter zijn identiek aan elkaar. Elk geeft derhalve met haar gewicht en massatraagheidsmoment een eigen bijdrage aan het tempo.

slagtoon	diameter (mm)	rechte as	krukluidassen			
			60	55	50	45
f	2331	37,0	34,7	31,8	28,9	26,0
fis	2200	38,1	35,7	32,7	29,7	26,8
g	2077	39,2	36,7	33,7	30,6	27,5
gis	1960	40,3	37,8	34,6	31,5	28,3
a	1850	41,5	38,9	35,7	32,4	29,2
ais	1746	42,7	40,0	36,7	33,4	30,0
b	1648	44,0	41,2	37,8	34,3	30,9
c^1	1556	45,3	42,4	38,9	35,4	31,8
cis^1	1468	46,6	43,7	40,0	36,4	32,,8
d^1	1386	47,9	44,9	41,2	37,5	33,7
dis^1	1308	49,4	46,3	42,4	38,6	34,7
e^1	1235	50,8	47,6	43,7	39,7	35,7
f^1	1165	52,3	49,0	44,9	40,8	36,8
fis^1	1100	53,8	50,5	46,2	42,0	37,8
g^1	1038	55,4	51,9	47,6	43,3	38,9
gis^1	980	57,0	53,5	49,0	44,5	40,1
a^1	925	58,7	55,0	50,4	45,9	41,3
ais^1	873	60,4	56,6	51,9	47,2	42,5
b^1	824	62,2	58,3	53,4	48,6	43,7
c^2	778	64,0	60,0	55,0	50,0	45,0
cis^2	734	65,9	61,8	56,6	51,5	46,4
d^2	693	67,8	63,6	58,3	53,0	47,7
dis^2	654	69,8	65,4	60,0	54,6	49,1
e^2	617	71,8	67,3	61,7	56,1	50,5
f^2	583	73,9	69,3	63,6	57,8	52,0
fis^2	550	76,1	71,4	65,4	89,5	53,5
g^2	519	78,3	73,4	67,3	61,2	55,1
gis^2	490	80,6	75,6	69,3	63,0	56,7
a^2	462	83,0	77,8	71,3	64,8	58,4
ais^2	437	85,4	80,1	73,4	66,7	60,1
b^2	412	87,9	82,4	75,6	68,7	61,8
c^3	389	90,5	84,9	77,8	70,7	63,6
cis^3	367	93,2	87,3	80,1	72,8	65,5
d^3	346	95,9	89,9	82,4	74,9	67,4
dis^3	327	98,7	92,5	84,8	77,1	69,4
e^3	309	101,6	95,2	87,3	79,4	71,4
Tempo's van rechte as met vliegende klepel en krukassen met vallende klepel						

Uit de grafiek kan men afleiden dat bij een onderzetting van nul, dus bij een rechte luidas, het tempo voor deze as op rond 58 aanslagen per minuut ligt. Gaat men geleidelijk aan de onderzetting invoeren dan gebeurt er aanvankelijk nog slechts weinig met dit tempo. Wel zal al spoedig de klepel van een vliegende in een vallende veranderen. Daartussen ligt een onderzetting waarbij de klepel noch vliegend noch vallend is. Hij beweegt star met de klok mee en geen geluid zal gehoord worden. Het is ook om die reden dat pas een onderzetting vanaf 20 cm te gebruiken is. De echte krukluidassen worden daarom met een onderzetting tussen 25 en 45 cm uitgevoerd. Want niet alleen zal men met die waarden de beste aanslag realiseren, doch bovendien is in dit gebied het tempo het gemakkelijkste te beïnvloeden. Dat werkgebied is in de grafiek aangegeven. Nog grotere onderzettingen zijn onbruikbaar. Ze zouden een ontoelaatbare contacttijd tussen klok en klepel tot gevolg hebben. Bovendien is het maar de vraag of de klepel de klok correct zal anslaan.

Danktij de onderzetting kan bij een gegeven luidas het tempo, zij het natuurlijk binnen zekere grenzen, naar believen gekozen worden. In de praktijk zijn daarom verschillende temporeeksen in gebruik geraakt (tabel). De derde kolom geeft het tempo van de rechte luidas voor verschillende klokgroottes. Strikt genomen gelden ze slechts voor een bepaald type rechte as, dus voor assen waarvan het gewicht en de afmetingen in vaste verhoudingen staan ten opzichte van de bijbehorende klok. Gaat men er echter vanuit dat afwijkingen in die onderdelen nooit groot zullen zijn, dan kunnen de hier gegeven waarden binnen kleine marges voor de rechte as als algemeen geldend aanvaard worden.

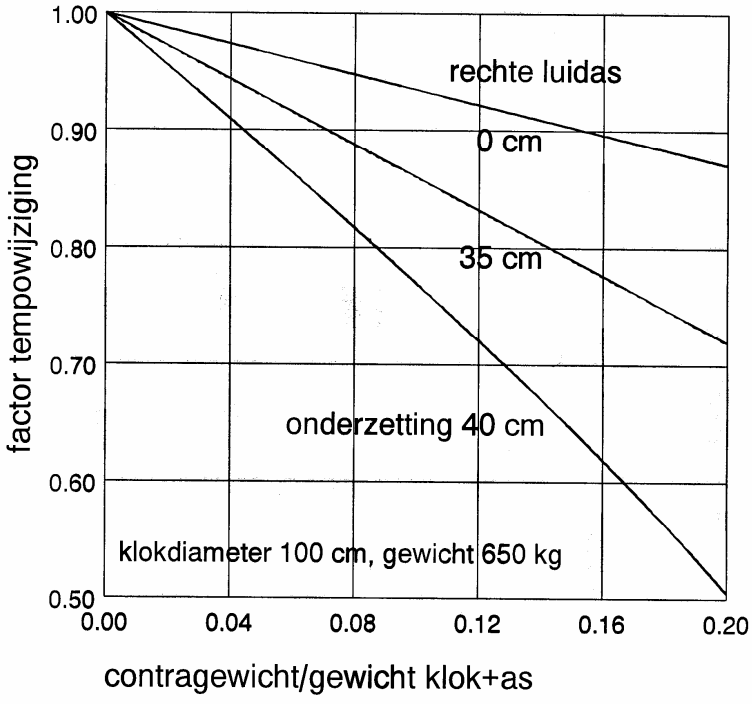
De genoteerde tempo's werden doorgaans aan de praktijk ontleend ofschoon ze ook voor elke klok met luidas berekend kunnen worden. Het gemakkelijkst is echter om van de standaardklok met standaard luidas het tempo experimenteel te bepalen dan wel via berekeningen, om vervolgens het tempo van alle andere klokken hieruit met een simpele formule af te leiden. Als de overige factoren namelijk naar verhouding dezelfde blijven, is het tempo alleen nog maar omgekeerd evenredig met de wortel uit de diameter van de klok. Om die reden bijvoorbeeld zal over twee octaven het tempo met een factor twee veranderen. Heeft een c^1 bijvoorbeeld een tempo van 40 aanslagen per minuut dan zal de c^3 per minuut 80 keer worden aangeslagen.

Is door afwezigheid van enige onderzetting het tempo van een rechte as een min of meer gegeven grootheid, bij krukassen is dat natuurlijk anders. Figuur 51 leert immers dat met behulp van de onderzetting men elk gewenst tempo kan verlangen. Zo geeft reeks 60 de tempo’s aan op basis van een tempo van 60 slagen per minuut voor de c^2. De onderzetting is dan ten naaste bij 0,25 maal de diameter van de klok. Reeks 55 is voor dezelfde klok gebaseerd op een tempo van 55 slagen per minuut. De daarbij behorende onderzetting is circa 0,33 maal de doorsnede van de klok. Overigens geldt ook hier wat al eerder voor de rechte as gesteld werd. Zijn eenmaal de standaard-luidklok en de daarbij behorende grootheden bekend, dan kunnen de overige tempo's berekend worden, ervan uitgaande dat deze omgekeerd evenredig zijn met de wortel uit de klokdiameters.

Uiteraard hebben de verschillende temporeeksen hun voor- en tegenstanders. In het algemeen wordt de rechte as als enigszins haastig ervaren. Voorts genieten de reeksen 60 en 55 een lichte voorkeur in Nederland, terwijl in België de voorkeur meer naar 50 en 45 uitgaat. De klokken in Nederland luiden daarom gewoonlijk op basis c^2 is 60 in België c^2 is 50 aanslagen per minuut.

9.3 Praktische toepassingen

Wanneer het tempo van een enkele luidklok enigszins afwijkt van de waarde die men verwachtte, zal daar in het algemeen niet zo zwaar aan getild worden. Worden de afwijkingen groot, dan zullen echter correcties aangebracht moeten worden. Wijziging van de onderzetting is in dat stadium echter buitengewoon moeilijk geworden, reden waarom een verhoging van het tempo vrijwel uitgesloten is, terwijl voor verlaging van het tempo de oplossing gezocht kan worden in het aanbrengen van een contragewicht. De wijze waarop dit geschiedt. is in figuur 50 (9.1) met letter B aangegeven.



Figuur 52: De invloed van het contragewicht.

Een contragewicht wijzigt zowel het totale gewicht van het aanslagsysteem als het massatraagheidsmoment en bovendien de ligging van het zwaartepunt. Het effect van dat gewicht is gezien het traagheidsmoment des te ingrijpender naarmate de afstand tussen het gewicht en de draaiingsas groter wordt gekozen. In figuur 52 zijn daarover enkele getallen verzameld voor de eerder genoemde klok met een doorsnede van een meter. Deze weegt met kroon circa 650 kg. Horizontal is de verhouding tussen het contragewicht en het gehele luidassysteem uitgezet. Indien wij dat op 750 kg stellen, is 0,20 gelijk aan een contragewicht van 150 kg. Opgemerkt zij bovendien dat voor deze grafiek het contragewicht op een afstand van 45 cm van het draaipunt werd aangebracht. Verticaal is de factor gegeven waarmee het luidtempo zonder contragewicht zich wijzigt met het aanbrengen van een contragewicht op een bepaalde afstand van het draaipunt. Voorts zijn in de grafiek drie lijnen getekend en wel voor de rechte luidas, een as zonder nederzetting dus. Voorts twee krukassen met onderzetting van 35 cm en 40 cm.

De aflezing is verder eenvoudig. Een klok met doorsnede 1 m zal bij een onderzetting van 35 cm en een contragewicht van 0.1 x 750 = 75 kg op een afstand van 45 cm van de draaiingsas ongeveer met een factor 0.75 in tempo afnemen. Meer in het algemeen blijkt uit de grafiek dat naarmate de onderzetting en het contragewicht toenemen de afname van het luidtempo steeds groter wordt.

Zoals gezegd, het corrigeren van het tempo van een enkele luidklok zal in de praktijk slechts weinig voorkomen. Anders is dat echter bij een gelui. Niets is namelijk monotoner wanneer bijvoorbeeld twee klokken in precies hetzelfde tempo of met zeer verschillende tempo's worden aangeslagen. Veel aantrekkelijker is het immers wanneer elk zijn eigen snelheid heeft en wel met een zodanig verschil dat beide klokken als het ware een ritmisch klankspel met elkaar uitvoeren. Aanvankelijk klinken de twee klokken vrijwel gelijktijdig om geleidelijk aan na elkaar gehoord te worden. De kleinste klok zal op de grotere voorop raken. Na verloop van tijd zullen beide echter weer bij elkaar uitkomen, waarna het spel opnieuw kan beginnen.

Op welke wijze dit moet geschieden, kan in feite al uit de tabel met de aanslagtempo's uit 9.2 afgeleid worden. Daar namelijk de tempo's omgekeerd evenredig zijn met de wortel uit de diameters en de diameters op hun beurt omgekeerd evenredig met de frequentieverhoudingen, zullen de tempo's recht evenredig zijn met de wortel uit de frequentieverhoudingen. Met behulp van de tabel in 6.1 kan men dan gemakkelijk vaststellen dat de tempo's van twee klokken die op een hele toon van elkaar liggen zich ten naaste bij verhouden als 17:18. Voor een kleine terts is dat 11:12 en voor een grote 8:9. De herleiding van de exacte verhoudingen tot eenvoudige getallen heeft overigens een uiterst praktische betekenis. Bij een gelui met klokken c^{l} en d^{l} bijvoorbeeld betekent dit dat wanneer de c^{l} 17 slagen heeft gemaakt de d^{l} er 18 moet hebben gehad. Bij klokken op een interval van een grote terts is die ritmische periode aan zienlijk korter. Daar ontmoeten de klokken elkaar al weer wanneer de c^{l} 8 slagen heeft gemaakt en de e^{l} 9 slagen.

Intussen moet aan al deze getallen niet zoveel waarde toegekend worden als zou er nooit van afgeweken mogen worden. Het maakt immers weinig uit of bij een hele toon de klokken weer gelijktijdig klinken na 17 en 18 slagen, dan wel na 16 en 17 of 18 en 19. Vanuit deze vanzelfsprekende soepelheid kan men voor een melodisch driegelui met getransponeerde tonen c^{l} – d^{l} - e^{l} de verhoudingen noteren van 16:17:18. Bovendien geldt hierbij, en wij zeiden het reeds eerder in een iets ander verband, dat wanneer alle klokken iets te snel of iets te langzaam zijn, men daar geen problemen van behoeft te maken. Doel is slechts dat binnen redelijke grenzen het niveau der tempo's aanvaardbaar is en de verhoudingen daartussen een duidelijk schema volgen.

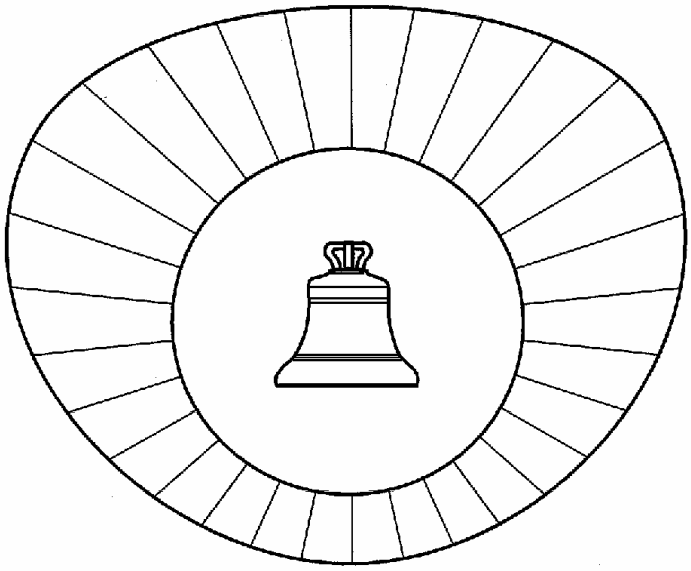
Is een gelui eenmaal in de toren geïnstalleerd en men constateert in de tempo's storende afwijkingen dan kunnen, zoals gezegd, correcties in principe alleen maar met een contragewicht gerealiseerd worden. Figuur 52 laat zien dat die beïnvloeding bij een rechte as moeilijker is dan bij een krukas. Toch zal men de mogelijkheden van een krukas met contragewicht niet volledig kunnen benutten. Immers, bij sterke tempodalingen is de kans niet denkbeeldig dat de klepel de klok niet raakt of dubbelslag laat horen, dat de aanslag derhalve uit meerdere slagen zeer snel achter na elkaar bestaat.

9.4 Het bim-bam effect

Het is stellig waar dat de bekoorlijkheid van een luidklok vooral ontleend wordt aan het *bim-bam effect*. Tijdens het schommelen aan de luidas hoort de luisteraar een zich voortdurend wijzigende klank. Het ene ogenblik overheerst de grondtoon (bam of dong), het andere ogenblik zijn de boventonen alleenheersers (bim of ding). Gaat men het verschijnsel analy-

seren dan blijkt in de eerste plaats dat het bim-bam verschijnsel des te duidelijker wordt, althans wanneer de klok niet bijzonder groot is, naarmate men méér in de luidrichting luistert. Bovendien zal de luisteraar bemerken dat de bim optreedt wanneer de mond van de klok naar hem toe gericht is, terwijl de bam te beluisteren valt wanneer de klok de tegenovergestelde positie heeft ingenomen. Vandaar dat men ook wel eens van het *mondingeffect* spreekt.

Bij een verdere analyse van het verschijnsel kan figuur 53 uitstekende diensten bewijzen. In deze tekening is de sterkte van de grondtoon door middel van lijnlengtes aangegeven. Duidelijk blijkt dat de grondtoon aan de kant van de mond van de klok aanzienlijk zwakker is dan wanneer men in de richting van de flank luistert.



Figuur 53: De luidheid van de grondtoon rondom de klok.

De oorzaak van het bim-bam effect is thans wel duidelijk. Het ene ogenblik ziet de luisteraar als het ware uitsluitend de mond van de klok (bim), het andere moment daarentegen kijkt hij recht op de flank (bam). Opvallend is overigens dat dit verschijnsel bij kleine luidklokjes vrijwel afwezig is, terwijl omgekeerd bij zware klokken het steeds opvallender wordt. Waarschijnlijk heeft dat te maken met de afmetingen van de klok. Immers, bij grote klokken wordt de andere zijde van de klok beter afgeschermd dan bij kleine.

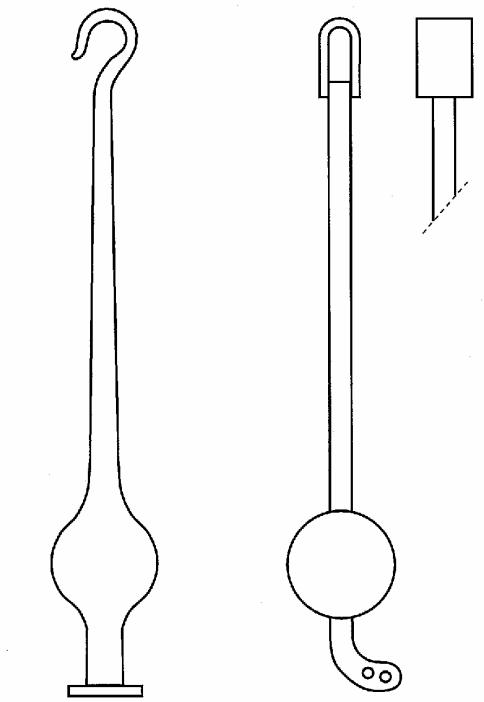
Omdat het bim-bam verschijnsel afhankelijk is van de zijde die de klok naar de luisteraar toewendt, ligt het voor de hand dat bij een rechte luidas het bim-bam opvallender is dan bij een krukas. Een klok met vliegende klepel immers wordt veel hoger opgeluid (9.1). Omgekeerd betekent het, dat naarmate de onderzetting groter wordt gemaakt en de klok daarom steeds minder hoog mag opluiden, het bim-bam effect onvoldoende tot zijn recht kan komen.

Dikwijls wijdt men het bim-bam effect aan het *Doppler-effect*. Dat zegt wanneer een geluidsbron van ons af beweegt de toonhoogte zal dalen, terwijl omgekeerd, als de toonhoogste stijgt de bron naar ons toe beweegt. Aan de sirenes van brandweerwagens en ambulances is dat zeer duidelijk te horen. Maar bij de klok is dit effect niet sterk aanwezig. Men berekent bijvoorbeeld dat een c^2-klok wanneer deze door haar evenwichtstoestand gaat, een snelheid van circa 5 m/s heeft. Dit leidt tot een daling dan wel stijging van ongeveer 25 cents. Tijdens het luiden is er derhalve geen stabiele toon. Maar het Doppler-effect zegt niets over de timbreverandering zoals in bim-bam of ding-dong wordt uitgedrukt. Dat kan alleen met het mondingeffect verklaard worden. Maar dat het Doppler-effect bijdraagt aan de levendigheid van de luidklok valt natuurlijk niet ontkennen.

10 DE TRACTUUR VAN DE BEIAARD

10.1 De speelklepel

De klepels die in een beiaard worden toegepast, zijn in hoofdzaak tot twee typen te herleiden. De historische vorm vindt men in de linker klepel uit figuur 54. Het gaat daarbij om een conisch uitgesmede klepel met aan de bovenzijde een haak om hem in de klok op te hangen en aan de onderzijde voorzieningen om de klepeldraad te bevestigen. Die draad wordt met een nog nader te bespreken mechaniek (10.2 - 10.5) naar het klavier (10.6) geleid.



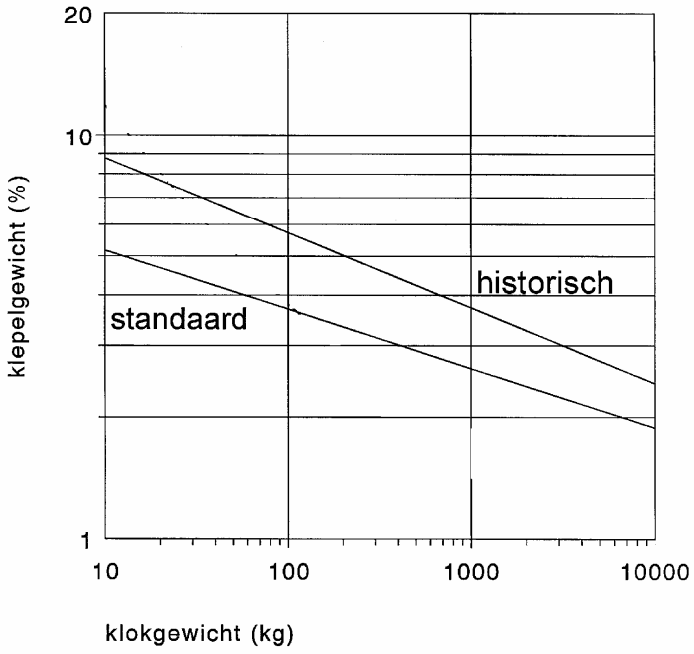
Figuur 54: Een historische en moderne beiaardklepel.

De moderne klepel (rechts) is aanzienlijk eenvoudiger en daardoor ook veel goedkoper. Om die reden wordt daar in de meeste gevallen de voorkeur aan gegeven. Dit type bestaat uit een ronde staaf waar omheen een bol uit mangaanmessing dan wel ijzer is gegoten. De onderzijde is dikwijls plat uitgesmeed voor de bevestiging van de klepeldraad; de bovenzijde is voorzien van een speciale ophangmogelijkheid. Hierover zal later nog gesproken worden. Het verschil in vormgeving tussen de historische en moderne klepel ligt dus vooral in het feit dat het gewicht van de laatste volledig in de bol is geconcentreerd, terwijl dat bij de historisch min of meer over de gehele klepel verdeeld is. Vandaar ook dat de moderne wat lichter worden gemaakt dan de historische. Het zal natuurlijk duidelijk zijn dat de ophanghaak van de historische klepel vervangen kan worden door een plat uitgesmeed uiteinde zoals de moderne klepel die bezit.

Vanzelfsprekend rijst de vraag welke klepel op speeltechnische en muzikale gronden de voorkeur verdient. Daar hierin nimmer een systematisch onderzoek heeft plaatsgevonden, is op die vraag alleen maar vanuit de ervaring een antwoord te geven. Meestal is men geneigd de klassieke klepel geschikter te achten dan de moderne. Of hierin echter het model een overwegende rol speelt, is lang niet zeker. Veeleer moet men aannemen dat het smeedijzer waaruit een dergelijke klepel gemaakt moet worden, de doorslaggevende factor is.

Het materiaal waaruit de beiaardklepel gemaakt kan worden, is smeedijzer, gietijzer en mangaanmessing. De laatste twee worden dus gegoten, de eerste gesmeed. Het lijkt erop dat de gesmede klepels op grond van een rijker timbre boven de gegoten exemplaren gesteld moeten worden. Dit onderscheid is mede terug te voeren tot verschil in hardheid. Uitgedrukt in de schaal van Brinell heeft goed smeedijzer een hardheid van $H_b = 105$ kg/mm^2, gietijzer ligt tussen $H_b = 120 – 200$ kg/mm^2 en mangaanmessing $H_b = 120$ kg/mm^2. Deze hardheden

ontlopen elkaar dus niet veel, althans indien wij ons beperken tot de lage waarden van gietijzer. In de praktijk komt het er overigens op neer dat naar een hardheid van H_b = 110 kg/mm^2 gestreefd wordt.



Figuur 55: Klepelgewicht in procenten van klokgewicht.

In 4.11 hebben wij reeds een en ander gezegd over het gewicht van de speelklepel. Figuur 55 geeft nadere informatie. Horizontaal zijn de klokgewichten gegeven, verticaal het gewicht van de klepel in procenten van het klokgewicht. Men ziet hoe daarin de historische gesmede klepel loopt van 2½% voor een klok van 10.000 kg tot 9% voor een 10 kg zwaar klokje. De moderne reeks begint met 2% om te eindigen bij 5%. Dat de kleinere klokken relatief zwaardere klepels krijgen, is noodzakelijk om zich enigszins met de veel zwaardere klokken te kunnen meten.
Natuurlijk kan men een verhoging van de klanksterkte ook realiseren door de klepel over een grotere afstand naar de klok te bewegen. Het nadeel is echter dat de klok dan gelijktijdig fel en scherp kan gaan klinken, reden waarom men voor alle speelklokken van een beiaard. ongeacht hun grootte, de regel hanteert dat de afstand tussen klok en klepel, de klepelweg, ongeveer twee tot vier cm dient te zijn. Uiteraard is dit alles mede afhankelijk van de muzikale smaak en derhalve ook tijdgebonden. Ditzelfde geldt overigens ook voor de klepelgewichten die elders en in andere tijden veel lichter geweest kunnen zijn.

In het voorafgaande werd stilzwijgend aangenomen dat de beiaardier in staat is om de klepel met voldoende kracht naar te klok te drijven teneinde deze aan te slaan. Hoe vanzelfsprekend dat ook lijkt, het betekent allerminst dat de daarvoor noodzakelijke voorzieningen in de tractuur ook voor de hand liggen. Op dit punt zal in de volgende hoofdstukken uitvoerig teruggekomen worden. Wij beperken ons hier tot de rol die de stand van de klepel daarin speelt. Gemakkelijk is namelijk in te zien dat hoe steiler de klepel in de klok hangt, dus hoe meer de klepelstand een verticale lijn benadert, des te minder kracht nodig is om hem uit zijn rustpositie te trekken. Het is om die reden dat vanaf klokken zwaarder dan een a^1-klok (ca.450 kg) het ophangpunt van de klepel in het plafond van de klok geleidelijk aan steeds verder uit het midden wordt gebracht, ja soms zelfs zo ver dat de klepelsteel volgens het profiel van de klokkenflank moet worden meegebogen. Het effect daarvan is dat de klepel steeds steiler in de klok komt te hangen, waardoor minder kracht nodig is om de klepel in beweging te brengen. In de praktijk worden daarbij enkele globale regels gehanteerd.

Bij klokken kleiner dan de a^1-klok hangt de klepel in ruststand ongeveer onder een hoek van 25^0 ten opzichte van de verticaal. Bij klokken die groter zijn, dus zwaarder, wordt de klepel steeds verder uit het midden gehangen. De hoek tussen de klepelsteel en de verticaal wordt derhalve steeds minder. De grens ligt bij een hoek van 10^0, die bij zeer zware klokken wordt toegepast. Een nog geringere hoek zou vrijwel alle weerstand uit het klavier doen verdwijnen en daarmee dynamisch spel onmogelijk maken. De klepelhoek ligt dus tussen 10^0 en 25^0. Noodzakelijk is echter dat verandering van die hoek vloeiend verloopt. Wanneer men dat zou nalaten, zou men immers een ongelijk lopend klavier krijgen. Overigens zij nogmaals opgemerkt dat het om globale waarden gaat. Want persoonlijke smaak en voorkeur kunnen eveneens een rol spelen.

Een belangrijk punt tenslotte is de klepelophanging. Bij het aantrekken van de klassieke klepel kunnen namelijk zijdelingse bewegingen ontstaan die bij het treffen van klok en klepel een schurend effect geven. Teneinde dit te vermijden wordt voor speelklokken op rijen met historische klepels de oplossing gekozen zoals die in figuur 64 van 10.3 geschetst is. Men ziet daarin dat de klepels onderling door kettinkjes verbonden zijn. Zodra één klepel naar voren wordt getrokken, zullen de beide kettinkjes zich spannen waardoor die klepel niet zo gemakkelijk meer naar links of naar rechts kan uitwijken. Bij de moderne klepels is echter een andere oplossing gekozen. Het scharnierpunt aan de bovenzijde wordt namelijk een dusdanige breedte gegeven dat de klepel uitsluitend naar voren en naar achteren kan bewegen. In figuur 54 is dat in een voor- en zijaanzicht getekend. Het lijkt overigens onverstandig om elke zijdelingse beweging uit te bannen, want daarmee wordt elke vorm van levendigheid verdreven. Dat geldt overigens voor alle onderdelen van de beiaard. Te grote perfectie leidt tot saaiheid.

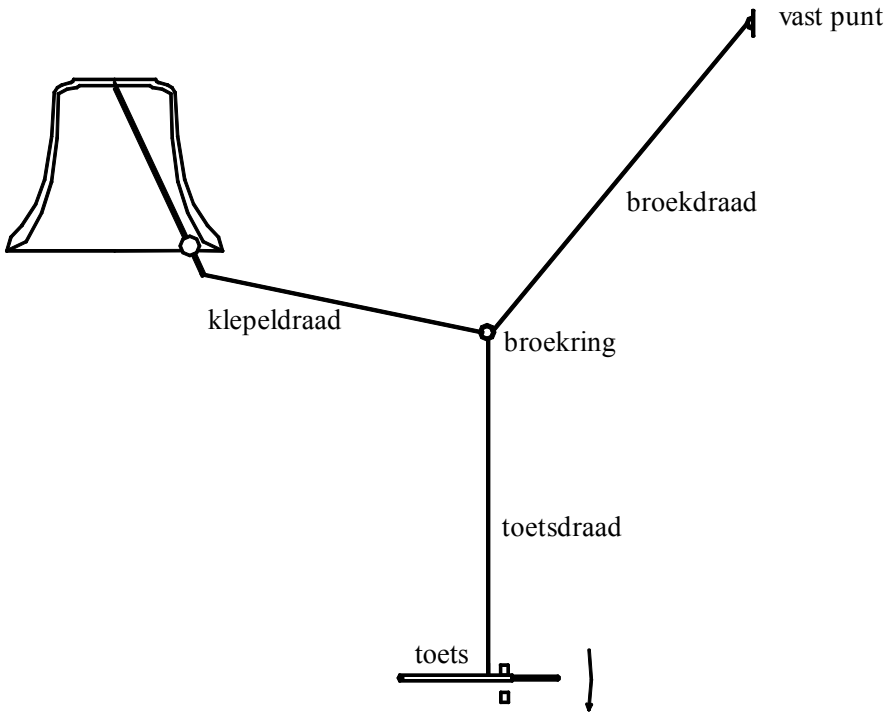
10.2 Het broeksysteem

Bij de bespreking van de tractuur van de slagklok hebben wij in 8.2 reeds een en ander over het zogenoemde *broeksysteem* verteld. Aldaar was het een vrij eenvoudig stelsel, maar bij toepassing op de beiaard kan het zelfs tot speeltechnische complicaties leiden.

In figuur 56 is de meest eenvoudige en daardoor ook de meest ideale broek getekend, De *klavierstok* draait om een vast punt. Aan de broekring zijn drie draden bevestigd te weten de *klepeldraad*, de *klavierdraad* en de *broekdraad*. De laatste is aan de andere zijde van de toren met een zogenoemd vast punt verbonden. Door de stok omlaag te drukken zal broekring omlaag en iets naar rechts bewegen. De consequentie daarvan is dat de klepel naar de slagring toebewogen wordt. Aldus wordt de klok aangeslagen.

Wellicht krijgt men de indruk dat in dit stelsel de klepel tegen de klokkenwand zal kleven en derhalve de voortgebrachte klank onmiddellijk weer afremt. In de praktijk is dat echter anders. De toets wordt niet geleidelijk ingedrukt, doch wordt zodanig aangeslagen dat de klepel met een zekere snelheid de slagring raakt. Daarnaast zit er onder andere door de ringen zoveel speling in het systeem, dat de klepel niet tegen de klok kan kleven, ervan uitgaande overigens dat de lengte der draden precies is afgesteld. Daartoe wordt in de klavierdraad een spanwartel aangebracht, een *draadregelaar*. Wij komen daar nog op terug.

Hoewel dit systeem op het eerste gezicht bijzonder eenvoudig lijkt, blijken er toch wel haken en ogen aan te zitten, althans als men zonder veel na te denken een broek aanlegt. Een broeksysteem, dus alle broekverbindingen in een beiaard, dient namelijk aan een aantal voor-



Figuur 56: De enkelvoudige broekverbinding.

waarden te voldoen die soms tegenstrijdig lijken of niet of nauwelijks te realiseren. Het overzicht ziet er als volgt uit:

Alle klepels moeten eenzelfde *klepelweg* afleggen dan wel moet daarin een vloeiende verloop zijn van de laagste naar de hoogste klok. De klepelweg is een van de parameters voor de klank.

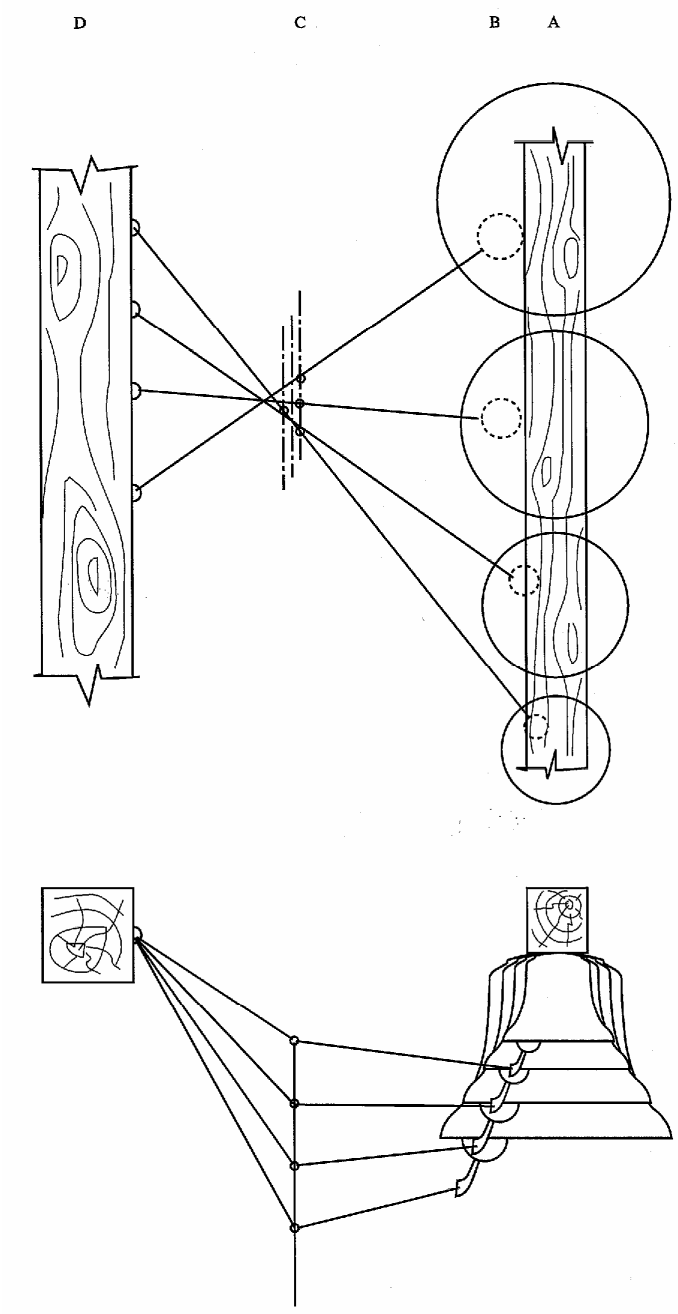
Omdat alle toetsen in een klavier over dezelfde afstand ingedrukt moeten worden, dus steeds met dezelfde *diepgang* (zie 10.6), moeten bij het indrukken van de toetsen alle broekringen over eenzelfde afstand omlaag gaan.

De *bovendruk* in de toetsen, dus bij de toetsen in ruststand, moet van laag naar hoog een vloeiend verloop hebben en mag de bespeelbaarheid niet in de weg staan. Een zwaar gaand klavier is derhalve uit den boze. Onder bovendruk verstaan wij het maximale gewicht dat aan het toetseinde kan hangen zonder dat de toets omlaag gaat.

De *onderdruk* moet groter zijn dan de bovendruk en wel volgens bepaalde waarden. Ook hier geldt de voorwaarde van een vloeiend verloop. Onder onderdruk verstaan wij het minimale gewicht dat aan het toetseinde kan hangen zonder dat de toets weer omhoog gaat.

Met het combineren van deze vier eisen is in het verleden voortdurend geworsteld, ja eigenlijk nog steeds ofschoon dat niet meer nodig is. Wij komen daar later op terug. Nu geven wij één van de oplossingen uit het verleden, namelijk maak alle broeken in een beiaard aan elkaar gelijk zodat, gezien het afnemend klepelgewicht naarmate de klok kleiner wordt, ook de toetsdruk in het klavier geleidelijk aan vermindert. Helaas is dat alleen maar in ideale gevallen mogelijk. Het is namelijk alleen dan redelijk uitvoerbaar wanneer de speelklokken in rijen boven elkaar hangen. Teneinde dit nader te illustreren is in figuur 57 zo'n rij klokken getekend. In deze tekening ziet men allereerst een bovenaanzicht. A zijn vier op elkaar volgende klokken, B geeft de plaats der klepelbollen aan, C de plaats waar zich de broekringen bevinden, d.w.z. recht boven het klavier waar de klavierdraden omhoog komen. D tenslotte is een

balk waar de broekdraden hun vaste punten vinden. Opgemerkt zij overigens dat lang niet altijd zo gemakkelijk een vast punt te vinden is. Vooral in lantaarntorens geeft dat nog al eens problemen. Uit de tekening blijkt duidelijk dat de plaats waar de klepel de klok raakt en het vaste punt van de broekdraad zodanig gekozen moeten worden, dat de lijn middelpunt klok - vast punt broekdraad over het punt gaat waar de bijbehorende klavierdraad omlaag moet gaan.

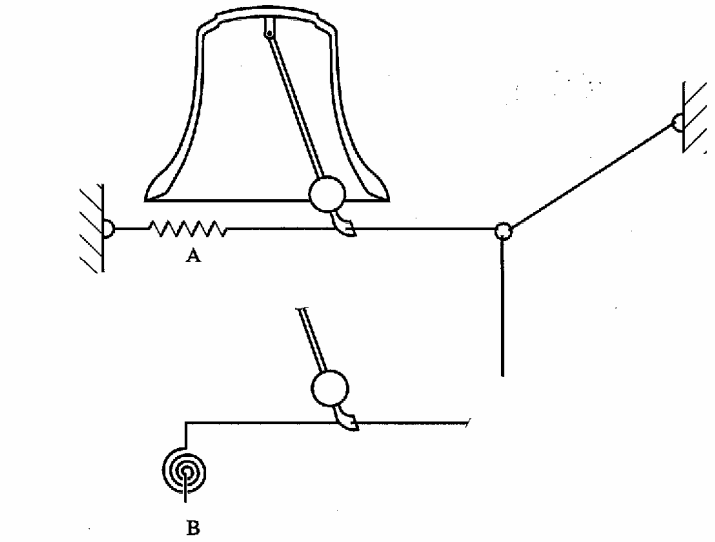


Figuur 57: Klokken op rij met broeken (boven- en zijaanzicht).

Hoewel met op rij hangende klokken voldaan schijnt te zijn aan de eis dat alle broeken dezelfde verhouding hebben, blijken er toch kleine verschillen te zijn. Zo zijn bijvoorbeeld de broek- en klepeldraden zeker niet exact aan elkaar gelijk. Maar ook bij een verticaal aanzicht zijn verschillen te constateren. In het onderste deel van de tekening is zo'n aanzicht vanuit rechts geschetst. Men ziet daarin dat de hoeken waarin de drie draden in de broekring elkaar treffen bij elke broek weer anders zijn. De reden is duidelijk, want zou men identieke verbindingen maken, dan zou tijdens het spelen de kans op het in elkaar haken van de draden niet denkbeeldig zijn. Men lijkt derhalve te moeten aanvaarden dat de bovenste broek veel vlakker is dan de onderste.

Wanneer zelfs in een zo ideale situatie als bij klokken op rijen een homogeen broekstelsel slechts bij benadering mogelijk is, kan men begrijpen dat in torens waarin de klokken min of meer verspreid moeten hangen en de vaste punten voor de broekdraden moeilijk te vinden zijn, dit vrijwel uitgesloten is. In die situatie lijkt men te moeten aanvaarden dat de klepelwegen verschillend worden en de klepelweg kan variëren tussen twee en bijvoorbeeld vijftien cm. Het heeft tot consequentie dat bij een broekstelsel een gelijke intonatie van alle klokken vrijwel ondenkbaar is.

Maar ook in de speeltechniek zou dit consequenties hebben, want naarmate de klepelweg groter wordt, moet de beiaardier ook meer druk op de toets uitoefenen. De ultieme oplossing is dan de veer. In figuur 58 is aangegeven op welke wijze dit gedaan kan worden. In de hoofdtekening ziet men achter de klepel een spiraalveer gemonteerd. Aan de ene zijde is die door middel van een draad aan de klepel verbonden, aan de andere aan een vast punt. Het type veer en de lengte daarvan bepalen dan de tegendruk tijdens het indrukken van de toets. Het effect is derhalve toetsverzwaring. Wordt nu achter elke klepel zo'n veer aangebracht, dan kan men door de spanning van elke veer individueel te regelen, de toetsen in het klavier alle even zwaar laten gaan. Soortgelijke resultaten kan men overigens ook bereiken door veren onder of aan de toetsen te bevestigen. Het bezwaar van die oplossing is echter dat de klepelbewegingen voor de beiaardier slechts moeilijk controleerbaar zijn. Hij speelt dan als het ware uitsluitend in de veren van zijn klavier.



Figuur 58: De klepel met een repetitieveer.

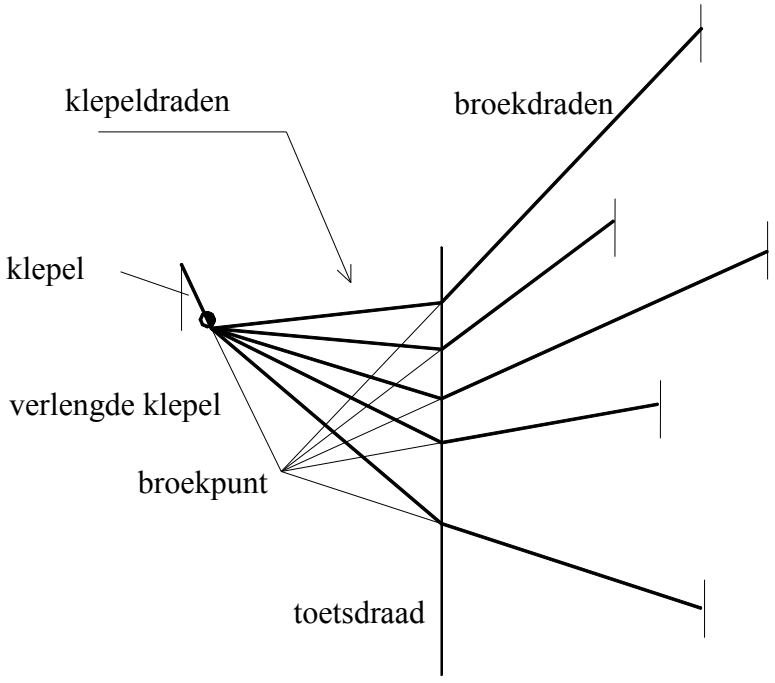
Het nadeel van een spiraalveer is dat wanneer deze over een grotere lengte uitgetrokken wordt, de veerkracht onevenredig toeneemt. Voor de beiaardier is dat erg hinderlijk. Weliswaar mag de tegendruk bij het indrukken van de toets zeker niet afnemen, doch het omgekeerde, althansw in extreme vorm, is evenmin toelaatbaar. Vandaar dat men een alternatief heeft gezocht in de opgerolde bladveer, een type dat de spiraalveer geheel heeft verdrongen. Deze veer is in een zijaanzicht in figuur 58 geschetst. Zou men de veer uitrollen dan zou men een strook metaal van circa 3 cm breed bij een lengte van 40 à 50 cm krijgen, voldoende lang derhalve om de veerkracht bij relatief grote belasting dezelfde te houden. Deze veer heeft bovendien nog het voordeel dat hij instelbaar is. Hij is namelijk gemonteerd op een vaste as. Door het aandraaien van de bout wordt de veer verder opgerold en derhalve sterker. Het gebruik is verder duidelijk. Het midden van de opgerolde veer wordt vastgehouden, het uiteinde met behulp van een draad verbonden met de klepel. Opgemerkt zij tenslotte nog dat deze veren gemaakt worden uit fosforbrons dan wel roestvrij staal. Aan het laatste materiaal wordt tegenwoordig allerwegen de voorkeur gegeven.

Het gebruik van veren achter de klepels moge bij een ongelijk lopend klavier tot een egale aanslag leiden, er zijn gevallen waarin ze ook nog een andere betekenis hebben. De klepels van de discantklokjes immers zijn zó licht dat ze na de aanslag niet of zeer traag terugval-

len. Het gevolg is dat de beiaardier tijdens het spelen in moeilijkheden kan komen. Ook om die reden worden achter de klepels voor klokken vanaf ongeveer f^2 veren geplaatst, en dat ongeacht de vraag of het klavier een al of niet gelijkmatig toucher bezit. Direct na de aanslag zorgt een veer ervoor dat de klepel snel terugvalt zodat de klok opnieuw gebruikt kan worden. Aldus zijn zeer snelle repetities mogelijk. Veren achter klepels staan dan ook bekend onder de naam *repetitieveer*.

In het vorengaande werd besproken hoe te licht gaande klepels zwaarder gemaakt kunnen worden. Men zou echter ook het omgekeerde kunnen nastreven, de zware derhalve lichter maken**.** Zulks kan vanzelfsprekend alleen maar door de veren in een tegengestelde positie te plaatsen. De ervaring op dat punt is echter niet altijd even gunstig. Slechts bij zeer zware klepels wordt het bij alle systemen van aantrekking toegepast. Men kan overigens betwijfelen of lichter lopende toetsen wel zo gunstig zijn. Het gemakkelijkst kan men dat inzien in de meest extreme situatie, namelijk wanneer slechts een klein tikje de toets al omlaag doet gaan. In dat geval immers is nauwelijks nog genuanceerd beiaardspel te verwachten. Alle beiaardiers zijn het er dan ook over eens dat een klavier een zekere weerstand moet bezitten, hoewel over de mate de meningen nog al verdeeld kunnen zijn.

Recapituleren wij. De klepelwegen moeten over de gehele beiaard hetzelfde blijven dan wel volgens een vloeiende lijn veranderen. Maar bij het broeksysteem lukt dat lang niet altijd en vandaar dat veren worden gebruikt die wel het klavier egaal maken maar niet de klankkleur. Immers, de klepelwegen blijven onderling verschillend. Zo is de stand van zaken indien men zich op bestaande ervaring baseert, en helaas gebeurt dat nog altijd. Beter ware het echter dat men zich door recent wetenschappelijk onderzoek naar het broeksysteem zou laten leiden. Wat is namelijk het geval?

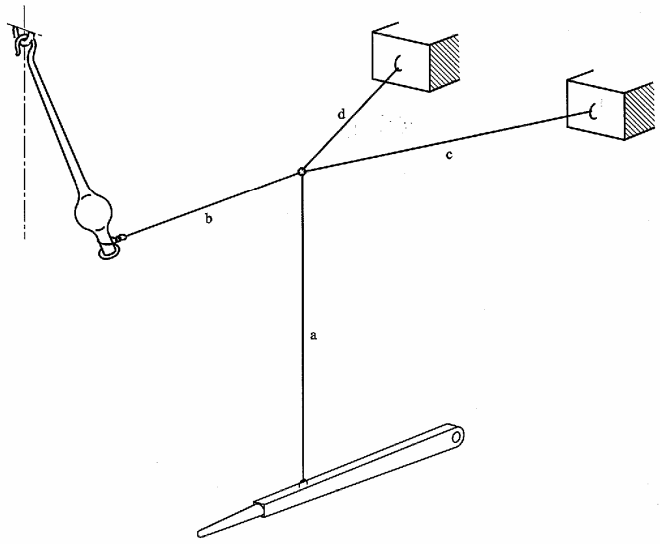


Figuur 59: Broekverbindingen met dezelfde eigenschappen.

In figuur 59 is een klepel met meerdere mogelijke broeken getekend. Ze hebben verschillende posities voor hun vaste punt en de broekring. Toch hebben zij een duidelijk gemeenschappelijk kenmerk, althans wanneer de broekdraden niet te kort worden. Alle verlengde broekdraden gaan namelijk door hetzelfde punt op het verlengde van de klepelsteel. Dat punt heet *broekpunt*. Ook gaan ze van dezelfde diepgang in het klavier uit. Onderzoek wijst vervolgens uit dat onder die omstandigheden alle broeken aan de klepel eenzelfde klepelweg geven en bovendien vrijwel

dezelfde boven- en onderdruk, dus de tegendruk bij indrukken van de toets en de druk wanneer de toets helemaal is ingedrukt. Hiermee wordt ook de aloude stelling weersproken waarin gezegd wordt dat vreemde broekgeometrieën slechte broeken opleveren. In feite is het niet de geometrie die een doorslaggevende rol speelt, doch de klepelweg. De druk in de toets is vrijwel uitsluitend van de weglengte afhankelijk! Ook zij opgemerkt dat de bewering dat een klepel door bepaalde broeken versneld wordt, onjuist is. De afstand die een klepel aflegt, is zó gering dat van versnelling geen sprake is. En als er al iets in die richting zou gebeuren, dan zou het vertraging moeten zijn.

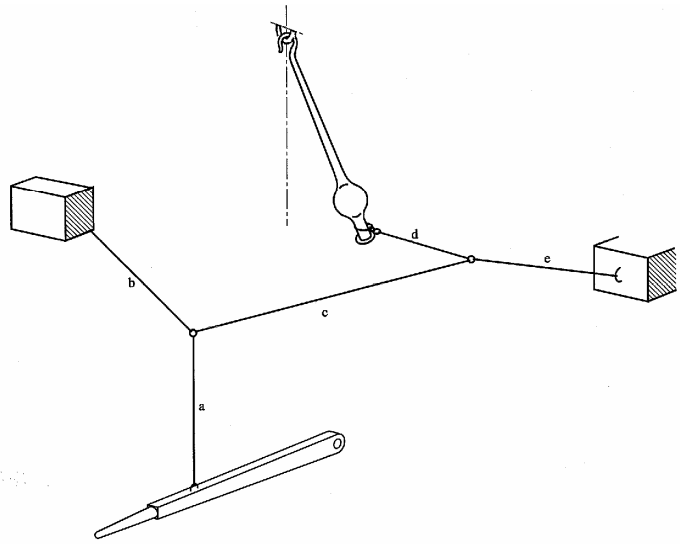
Een laatste stap ligt tenslotte voor de hand. Met behulp van wiskundige optimalisatie op de computer is het mogelijk te berekenen waar klokken in een toren gehangen moeten worden om een ideaal broeksysteem aan te kunnen leggen. Een speciaal daarvoor geschreven programma krijgt als input het aantal klokken, de gewenste klepelwegen, de plaats waar de klokken mogen hangen, de voorwaarde dat de draden niet in elkaar mogen haken enz. En vervolgens is in een oogwenk het resultaat op het scherm af te lezen.



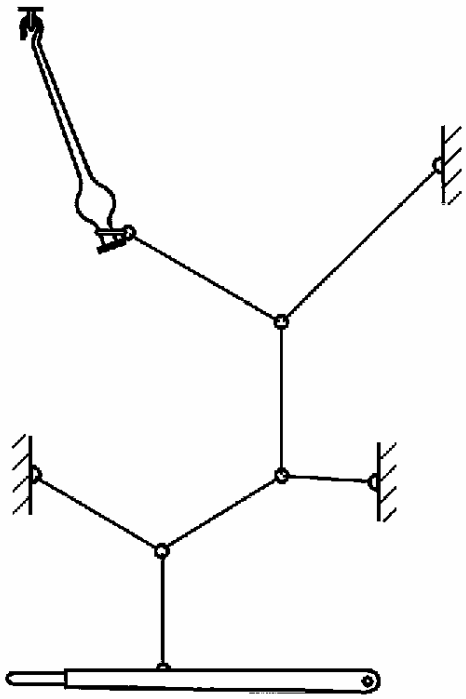
Figuur 60: Broek met gesplitste broekdraad.

In het voorafgaande is steeds gesproken over een zogenoemde enkelvoudige broek. In lang niet alle gevallen kan daar echter mee volstaan worden. Figuren 60-63 geven bijvoorbeeld meer gecompliceerde broeken. Die uit figuur 60 heeft betrekking op een situatie waarin een klok in de weg hangt, zodat de broekdraad gesplitst moet worden. Figuur 61 laat een situatie zien waarin het klavier bezijden de klok staat. En figuur 62 wanneer het klavier juist recht onder de klok staat

Toch blijft er nog een bezwaar bestaan. Vooral bij snel passagespel kunnen de draden door gemis aan ondersteuning in de knooppunten gaan slingeren, met alle lastige gevolgen van dien. Een werkelijk goede controle van het spel wordt daardoor aanzienlijk bemoeilijkt, zodat snelle repetities met een klok en ritmische nauwkeurigheid vragelijke kwesties kunnen worden. Het broekstelsel wordt daarom slechts nog bij hoge uitzondering voor handspel toegepast. Bij het mechanisch automatisch spel (zie 10.8) waar de bewegingen zoveel trager verlopen, is dat echter anders. Toch lijkt het broeksysteem door slechte ervaringen in het verleden ondergewaardeerd te worden. Op grond van nieuwe inzichten is dat niet verdiend.



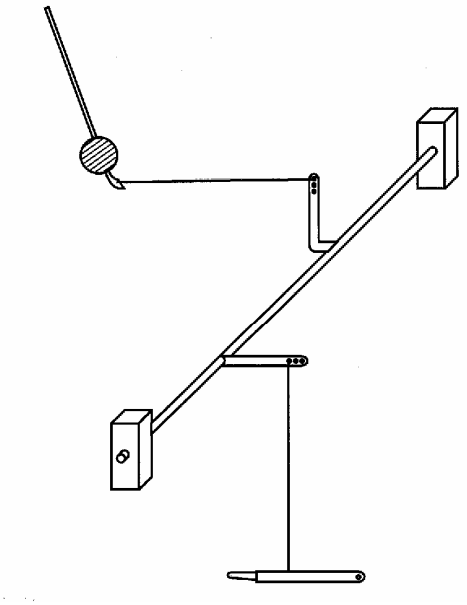
Figuur 61: Broek voor een klok bezijden het klavier.



Figuur 62: Dubbele broek voor een klok boven het klavier.

10.3 Het tuimelaarsysteem

Het voorafgaande hoofdstuk moest met een negatieve opmerking afgesloten worden. Het broekstelsel is te onvast van karakter om in alle situaties met werkelijk succes gebruikt te kunnen worden. Hoeveel anders is dat echter met het zogenaamde tuimelaarsysteem.



Figuur 63: Principe van een tuimelaarverbinding.

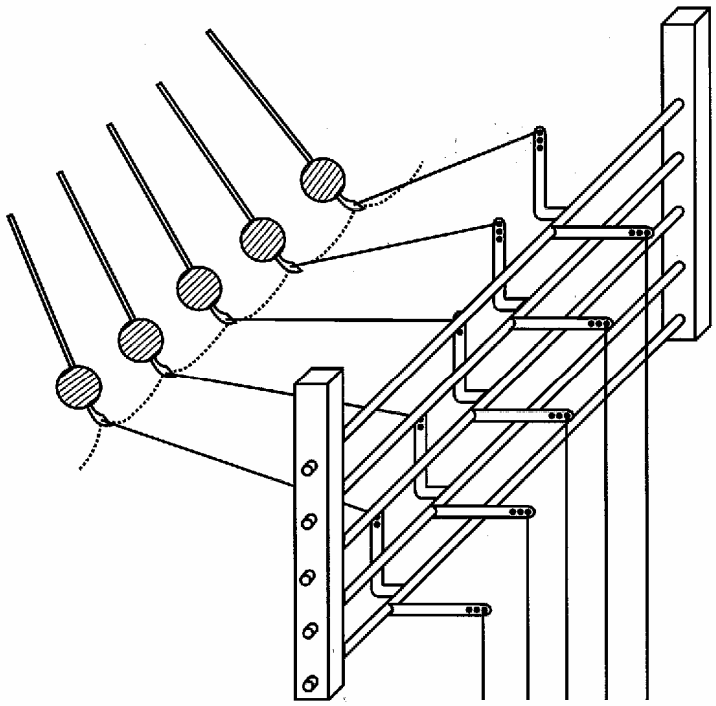
In figuur 63 is het principe van de tuimelaaras perspectivisch getekend. Een ijzeren staaf kan met haar ronde uiteinden in een bronzen of kunststof lager draaien dan wel een kogellager. Op de plaats waar de klavierdraad van de desbetreffende klok omhoogkomt, is de horizontale arm aan de tuimelaaras bevestigd. Daar waar de klepeldraad loodrecht op die as uitkomt, is een verticale arm geplaatst. Het principe is dan verder duidelijk. Zodra de toets ingedrukt wordt, gaat de horizontale arm naar beneden en helt de verticale arm naar achter. Aldus wordt de klepelbol naar de klok toe bewogen. Door de juiste draadlengtes te kiezen en enige speling in de overbrenging te laten, wordt de klok aangeslagen zonder dat de klepel blijft kleven. Een dergelijk systeem is vanzelfsprekend uitermate stabiel, althans wanneer de as voldoende dik wordt gekozen zodat geen storende torsie in die as kan optreden. Zou dat namelijk wél het geval zijn, dan treden analoge verschijnselen op als bij het broeksysteem, namelijk kans op onzeker beiaardspel als gevolg van het onvaste karakter der verbindingen.

Een tweede punt waarop gelet moet worden, is de soepele draaiing van de astappen in de bronzen of kunststof lagers. In het bijzonder geldt dit wanneer de as relatief lang is waardoor in het midden een extra lager voor ondersteuning nodig is. Als er dan al eens een bezwaar tegen dit systeem aangevoerd wordt, dan is het meestal daarin gelegen. Anderzijds gaat het hier om een zuiver technisch probleem dat met voldoende zorg gemakkelijk is op te lossen. Ditzelfde geldt natuurlijk ook voor de eerder gesignaleerde kwestie van de torsie.

Het zal duidelijk zijn dat een hoogwaardige tuimelaaras de beiaardier in staat stelt beheerst en genuanceerd te spelen. Maar er zijn meer voordelen. Het is bovendien mogelijk om de klokken in evenredigheid met hun klepelgewicht te laten klinken en de aanslag in het klavier daarmee in overeenstemming te brengen. Noodzakelijk daartoe is slechts dat de verticale resp. de horizontale armen alle even lang zijn. Is aan deze voorwaarde voldaan, dan kan het geleidelijk verlopen van de toetsdruk uitsluitend nog verstoord worden door variërende schuinte van de klepeldraden. Gemakkelijk is namelijk in te zien dat deze in de praktijk niet voor alle klokken dezelfde kunnen zijn. Zorgt men er echter voor dat de helling van deze draden tussen nul en tien graden ligt, waarbij die hoek bij het bevestigingspunt aan de klepel ge-

meten wordt, dan behoeft men in het klavier niet voor nadelige effecten beducht te zijn.

Intussen zal het duidelijk zijn dat door middel van de tuimelaars bewust kan worden ingegrepen in de speelaard van het klokkenspel. Indien namelijk de horizontale armen langer worden gekozen dan de verticale, zal de aanslag licht zijn en de klepelweg kort. Natuurlijk kan dit niet in het extreme worden doorgevoerd, daar op die wijze elke weerstand uit het klavier verdwijnt. Maar weerstand is noodzakelijk voor een beheerst spel, terwijl de afstand tussen klok en klepel te gering wordt om een redelijke klank te kunnen horen.



Figuur 64: Tuimelaarsysteem voor klokken op rijen.

Vanuit bovenstaande beschouwing zal het duidelijk zijn dat het hier voor een goed deel om een subjectieve kwestie gaat, een kwestie die bovendien met de tijd kan variëren. Zo kent men tuimelaars met gelijke armen van 15 cm. Ook zijn er waarvan de verticale arm 15 cm is tegen de horizontale 18 om. Thans is een verhouding van verticaal 18 cm en horizontaal 21 cm algemeen gebruikelijk. Opgemerkt zij overigens dat deze maten gelden voor de afstanden van het gat waarin de draad wordt bevestigd tot het draaipunt van de tuimelaar. Gelijktijdig zal het duidelijk zijn dat het niet onaantrekkelijk is in beide armen enkele gaten meer te boren opdat tijdens de installatie van de beiaard een aantal varianten mogelijk is. Denkbaar is bijvoorbeeld dat sommige klokken uit bepaalde registers harder dan wel zachter afgesteld dienen te worden.

Zoals reeds eerder werd opgemerkt (10.2). zijn ook bij de tuimelaars voor de discantklokken repetitieveren nodig. Bovendien is het in bepaalde gevallen niet ongebruikelijk om (ook nog) veren boven de klavierdraden te plaatsen. De klavierdraden worden dan als het ware iets opgetild, strak gehouden tussen de veren daarboven en de aanslag der toetsen daaronder.

Er zijn twee gevallen waarin dit toegepast wordt. Allereerst is dat in de situatie waarin de horizontale klepeldraden zó kort zijn dat daarin nauwelijks nog speling kan optreden. Het verplaatsen van de veren op aangegeven wijze kan dan geen beletsel zijn. Het tweede geval is de situatie waarin de verticale klavierdraden zó lang zijn, bijvoorbeeld meer dan vijf meter, dat een extra voorziening nodig is om ze toch strak gespannen te houden. In dit geval kunnen

de klepelveren bij de discantklokjes niet gemist worden. Bij deze wordt het gehele systeem zodoende tussen toets en twee veren strak gespannen, voorwaarde voor een controleerbaar beiaardspel. Een andere oplossing is op meerdere plaatsen een geleidelat aanbrengen. Hierop zijn oogjes aangebracht waardoor de klavierdraden lopen zodat ze niet zullen slingeren.

In het vorengaande is één aspect onbesproken gebleven. Daar het tuimelaarsysteem zonder enige twijfel een ideaal systeem is, rijst de vraag of het in alle gevallen toegepast kan worden. Helaas moet dat ontkennend beantwoord worden. Ter illustratie verwijzen wij naar figuur 64 waarin meerdere klokken met hun tuimelaarassen verenigd zijn. Duidelijk blijkt dat dit stelsel alleen dan gebruikt kan worden als de klokken in horizontale rijen boven elkaar hangen. Een klok immers die in het verlengde van een as hangt, kan niet aangeslagen worden.

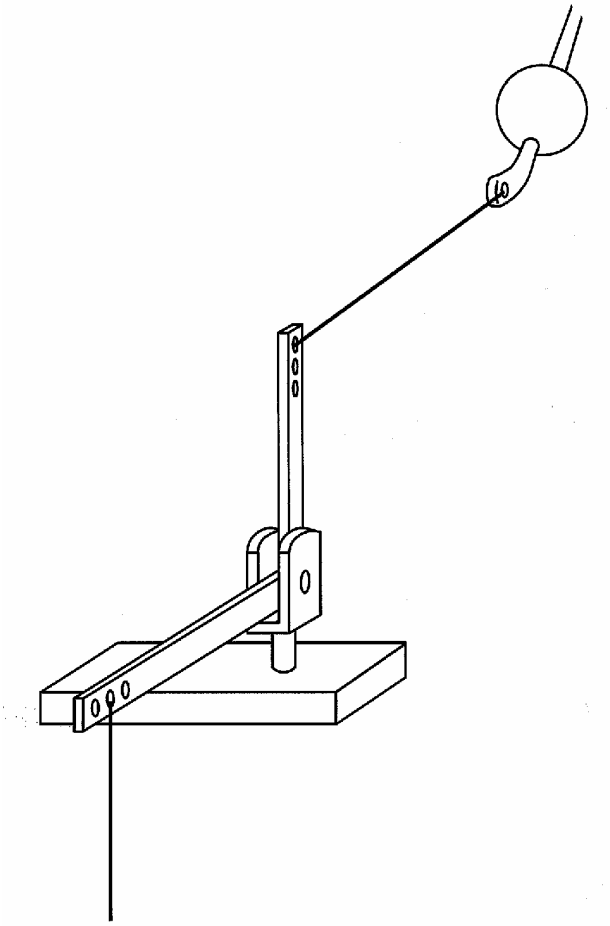
Dit alles impliceert dat het werken met tuimelaarassen in feite alleen maar mogelijk is in relatief grote torens waar de klokken op de aangegeven wijze opgesteld kunnen worden. Gelukkig is er nog een goede en volkomen verantwoorde variant, de *gerichte tuimelaar* die in 10.4 besproken zal worden. Vooraf moet echter een laatste opmerking gemaakt worden. In figuur 64 ziet men dat de klepels onderling door kettinkjes zijn verbonden. Zulks wordt gedaan bij klepels die zijdelingse bewegingen kunnen maken. Wordt in het geschetste geval een klepel aangetrokken dan zullen de twee kettinkjes die aan die klepel zijn vastgemaakt, zich spannen waardoor de klepel minder gemakkelijk naar links of naar rechts kan uitwijken (zie 10.1). Maar wij wezen er reeds eerder op, die kettinkjes kunnen vervallen wanneer de klepelophanging zodanig wordt uitgevoerd dat die zijdelingse bewegingen niet kunnen optreden (fig.54 in 10.1). Technisch is dat geen probleem, zodat kettinkjes nooit meer gebruikt worden.

10.4 De gerichte tuimelaar

Een *gerichte tuimelaar* zou gedefinieerd kunnen worden als een tuimelaar zonder horizontale as. In de perspectivische tekening 65 is dat aanschouwelijk voorgesteld. De horizontale en verticale arm liggen nu in eenzelfde vlak. Daar waar beide elkaar ontmoeten, kan de tuimelaar in een lager draaien. Dit lager op zijn beurt is een op een balk of ander vast punt gemonteerd. De werking is dan duidelijk. Zodra de klavierdraad omlaag wordt getrokken, helt de tuimelaar achterover en wordt de klepel naar de klokkenwand getrokken. Een bijzonder simpele constructie derhalve. Overigens moet er wel op gelet worden dat het lager voldoende soepel gaat en het geheel voldoende stabiel staat opdat onzeker beiaardspel vermeden wordt.

In welke gevallen echter dient de gerichte tuimelaar gebruikt te worden? Dit is in al die situaties waarin de klokken betrekkelijk willekeurig in de toren hangen, zodat een rek met tuimelaarassen onmogelijk is. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij een lantaarntoren waarin de klokken rondom in de openingen tussen de stijlen hangen. De werkwijze is dan de volgende. Voor elke klok wordt het uiteinde van de horizontale arm van de tuimelaar recht boven de plaats gebracht waar de verticale klavierdraad naar boven komt. Vervolgens wordt de tuimelaar vanuit dat punt zodanig gericht dat hij met de klepeldraad in één rechte lijn komt te liggen. Daarna wordt de tuimelaar op de balk of een speciaal daartoe geconstrueerd plateau vastgezet. Figuur 71 in 10.7 illustreert dit aan de hand van een tekening.

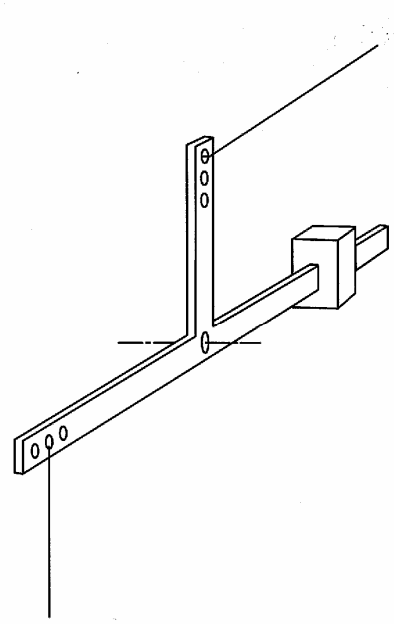
Overigens is allerminst gezegd dat de gerichte tuimelaar in een toren waarin het gebruik van assen voor de hand ligt, geheel uit den boze is. Persoonlijke inzichten spelen in dergelijk soort situaties een doorslaggevende rol.



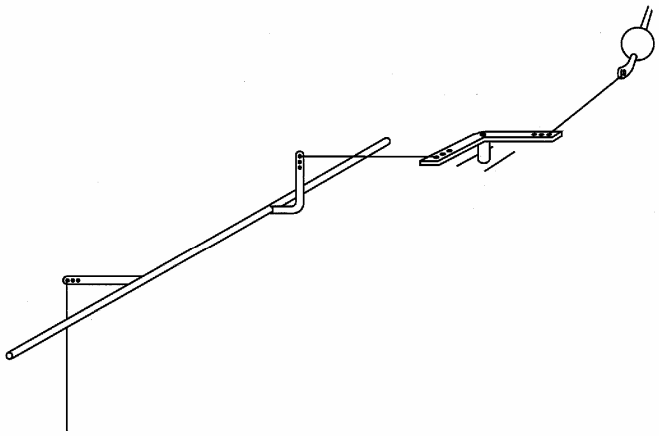
Figuur 65: De gerichte tuimelaar.

Wat de gerichte tuimelaar zelf betreft, natuurlijk is daar alles op van toepassing dat ook bij de tuimelaarassen van kracht is. Het betreft onder meer de verhouding tussen de absolute lengtes van de armen. het gebruik van veren enz. Voor het laatste wordt ook wel eens een andere methode gevolgd. In figuur 66 is dat nader geïllustreerd. Men ziet daarin dat de horizontale arm voorbij het draaipunt verlengd is en dat op die extra arm een gewicht geklemd is. Wordt nu de klavierarm omlaag getrokken, dan zal het gewicht op de verlengde arm ervoor zorgen dat de tuimelaar sneller terugvalt dan normaal. Dit kan bovendien nog geregeld worden door de grootte van het gewicht en de plaats daarvan op de arm,
Hoe logisch dit systeem van uitgebalanceerde tuimelaar ook lijkt, ook hier zijn nadelen te signaleren, De voornaamste is wel dat bij het indrukken van de toets niet alleen de klepel in beweging gebracht moet worden, doch ook het contragewicht. In principe is de aldus ingebrachte traagheid een belemmering voor soepel spel, en zeker wanneer het om zware klokken gaat en de contramassa daarom groot is. Een tweede bezwaar ontstaat wanneer met het oog op de contragewichten de veren achter de klepels achterwege worden gelaten. Bij lange horizontale klepeldraden is dat echter ten onrechte. Weliswaar zal het gewicht ervoor zorgen dat de toets in het klavier weer op snelle wijze zijn rustpositie inneemt, doch zulks is allerminst een garantie dat dit voor de klepel eveneens het geval zal zijn. De klepel kan derhalve eigen bewegingen gaan maken zonder dat de beiaardier dit opmerkt. De enige oplossing is dan toch veren achter de klepels aan te brengen, een toevoeging die op haar beurt de contragewichten weer overbodig maakt.

Tenslotte zij nog opgemerkt dat een combinatie van een tuimelaaras en een gerichte tuimelaar zeer wel mogelijk is. In het geval een klok bijvoorbeeld bezijden het tuimelaarrek hangt, kan een gerichte tuimelaar die horizontaal wordt geplaatst ervoor zorgen dat de klepeldraad loodrecht voor dat tuimelaarrek uitkomt (fig.67). Het bezwaar is natuurlijk dat een dergelijke dubbele overbrenging de toets zwaar en lui kan maken. Een echt goede oplossing voor het gesignaleerde probleem is bedoelde combinatie dus niet. Beter kan men de tractuur zodanig wijzigen dat met een gerichte tuimelaar alléén kan worden volstaan.



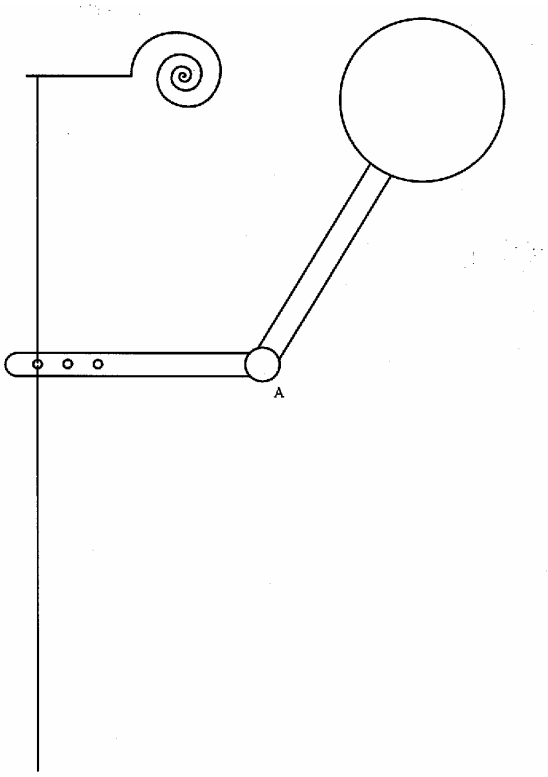
Figuur 66: Tuimelaar met contragewicht.



Figuur 67; Tuimelaaras gecombineerd met gerichte tuimelaar.

10.5 De tuimelklepel

Ervan uitgaande dat de draden tussen de klepels en het klavier kunnen rekken, slingeren, breken en wat al niet, ligt het voor de hand om naar middelen uit te zien die het geheel een meer stabiel karakter geven. E6n van de oplossingen is de *tuimelklepel*. Bij dit type is de horizontale klepeldraad vervallen en de klepelbol op de verticale arm van de tuimelaar gemonteerd (fig.68). De werking is dan erg eenvoudig. Wordt namelijk de klavierdraad omlaag getrokken, dan zal de tuimelklepel om A gaan draaien waardoor de klepelbol tegen de klok slaat. Het zal voorts duidelijk zijn dat de tuimelklepel zowel met de tuimelaaras als met een gerichte tuimelaar gecombineerd kan worden. In de praktijk wordt echter vrijwel altijd voor het eerste gekozen. Oorzaak is het feit dat de tuimelklepel eigenlijk alleen maar gebruikt kan worden voor klokken vanaf de c^3, ja nog liever vanaf de c^4. Deze kleine discantklokjes hangen omwille van de gemakkelijke aantrekking bijna altijd recht boven het klavier. Aldaar kunnen ze, ook al omdat ze betrekkelijk klein zijn, in horizontale rijen naast en boven elkaar gehangen worden. Logische consequentie daarvan tenslotte is een uitvoering van de tuimelklepel in combinatie met de tuimelaaras.



Figuur 68: Tuimelklepel met repetitieveer.

Waarom echter de tuimelklepel uitsluitend voor kleine klokjes? Figuur 68 kan dat aanschouwelijk maken. De kracht waarmee de toets die met een tuimelklepel is verbonden, moet ingedrukt worden, hangt niet alleen af van het gewicht van de klepelbol doch ook van de hoek tussen de verticale arm en het horizontale vlak, de horizontale arm in ruststand derhalve. Gewoonlijk wordt die hoek op 120^0 gekozen. Bovendien is gemakkelijk in te zien dat de tegendruk die in de toets ondervonden wordt, geringer wordt naarmate die toets verder is ingedrukt en de klepelsteel een meer verticale stand bereikt. Wordt die druk bij 120^0 op 1 gesteld, dan berekent men dat deze bij 110^0 nog 2/3 is, bij 100^0 nog slechts 1/3 en bij 90^0, dus wanneer de klepelsteel geheel verticaal staat, niets meer. Anders gesteld, de beiaardier voelt tijdens het indrukken van de toets de tegendruk verminderen, terwijl voor een controleerbaar spel juist het omgekeerde wenselijk is.

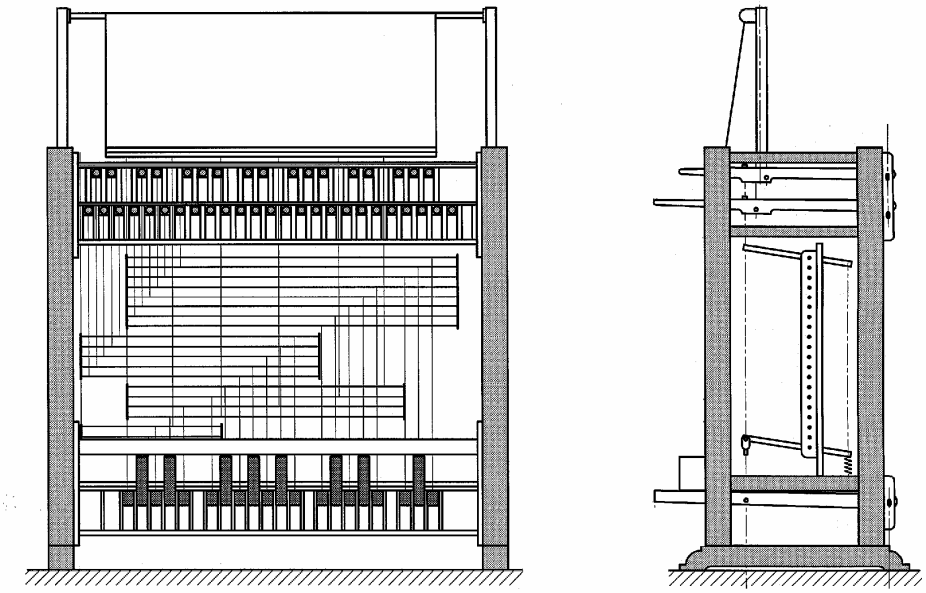
Dit alles moge duidelijk maken waarom de tuimelklepel slechts bij kleinere klokken toegepast kan worden. Bij zwaardere klokken met zoveel zwaardere klepelbollen zouden de verschillen immers te groot worden. Maar ook bij discantklokjes dient men extra voorzieningen te treffen, en wel in de vorm van een veer boven de horizontale arm. Deze veer met een progressief toenemende kracht zal namelijk de vermindering van de toetsdruk enigszins weten te compenseren. Helemaal verdwijnen zal het hinderlijk effect van de tuimelklepel niet, reden waarom dit type slechts bij hoge uitzondering nog wordt toegepast. Anderzijds lijkt het erop dat

nog nooit de goede veer is toegepast. Verder onderzoek zal noodzakelijk zijn.

Een van de voordelen van tuimelklepels bestaat eruit dat hij weinig ruimte vraagt. Zijn bij normale tuimelaars namelijk horizontale draden nodig, bij tuimelklepels zijn die overbodig geworden zodat een uiterst compacte bouw van de beiaard mogelijk is. Er zijn bepaald wel torens op te noemen waar dit een bijzonder aantrekkelijk voordeel is. Intussen bleef tot nog toe een wezenlijk nadeel onvermeld. Zowel in het broeksysteem als het tuimelaarstelsel zit zoveel speling dat de klok niet zeer exact wordt aangeslagen. Enige speling in de klepelslag is altijd aanwezig. En dat lijkt stellig een voordeel, want de tuimelklepel kent die onvastheid niet en lijkt om die reden een wat kleurloze aanslag te produceren. Kortom, de tuimelklepel is een discutabel systeem.

10.6 Het beiaardklavier

Van het *beiaardklavier*, ook wel *stokkenklavier* genoemd, is in figuur 69 een voor- en zijaanzicht gegeven. Daaruit blijkt dat het principe in wezen erg eenvoudig is (zie fig.56 in 10.2 en fig.63 in 10.3). De klavierdraad die aan één kant aan de broekring of tuimelaar verbonden is, wordt aan de andere zijde aan een stok, hetzij manuaal hetzij pedaal, bevestigd. Wordt deze ingedrukt dan zal de broekring of tuimelaar naar beneden worden getrokken, waardoor de klepel tegen de klok slaat.



Figuur 69: Het beiaard- of stokkenklavier.

Het zal natuurlijk duidelijk zijn dat in dit stelsel van verbindingen elke draadlengte zeer nauwkeurig gekozen moet worden. Is deze enkele millimeters te groot, dan zal bij het indrukken van de toets de klepel de klokkenwand nimmer bereiken. Is die lengte daarentegen te klein, dan zal de klepel tegen de klok kleven zodat de klank na het aanslaan onmiddellijk afgeremd wordt. Om die reden worden boven de manualen en de pedalen zogenaamde *draadre-*

gelaars aangebracht, spanwartels die door in- of uitdraaien iedere keer kort voor een bespeling de juiste lengte van de draden laten instellen. Telkenmale, omdat de afstelling zó nauwkeurig moet zijn dat zelfs met temperatuurverschillen, en daardoor minieme veranderingen in draadlengtes, rekening gehouden moet worden, Maar er dient ook aan tweede voorwaarde voldaan te worden. Zou men namelijk de draadlengte zodanig instellen dat bij ingedrukte toets de klepel tegen de slagring rust, de beiaardier zou dan gedwongen zijn om onmiddellijk na een aanslag de toets los te laten. Maar in de praktijk is dat niet aan de orde. In de draadverbinding zit namelijk een kleine speling, hetzij door een doorgebogen draad in rusttoestand hetzij door de speling in de bevestigingspunten. Tijdens de aanslag schiet de klepel door deze kleine speling heen om onmiddellijk daarna terug te vallen zodat de klok kan uitklinken, zelfs als de beiaardier de toets ingedrukt houdt.

Zoals uit figuur 69 blijkt, is bij het ontwerpen van het beiaardklavier duidelijk gedacht aan het orgel- of pianoklavier. De witte toetsen, de diatonische, liggen echter lager en zijn langer dan de zwarte toetsen, de chromatische. Maar voor het overige is elke gelijkenis afwezig, het zij dan dat ook het beiaardklavier, evenals dat van het orgel, een pedaal heeft.

Het is vanzelfsprekend noodzakelijk dat de afmetingen van beiaardklavieren overal dezelfde zijn. Het heeft echter eeuwen geduurd voordat dit enigszins gerealiseerd werd. Nochtans zijn er nog altijd twee duidelijk van elkaar te onderscheiden typen in gebruik. In hoofdzaak zijn dat de Europese standaard met een Nederlandse variant en de Amerikaanse standaard ofschoon ook daar hybride vormen voorkomen. In alle gevallen spreken wij dan over vier-octaafsbeiaarden.

De verschillen tussen beide hebben te maken met bijvoorbeeld de omvang en ligging van het pedaal. In Europa is dat $c^1 – g^2$, maar in de Verenigde Staten $c^1 – c^3$ als een waaiervormig en concaaf pedaal. Waaiervormig, omdat de pedalen niet evenwijdig naast elkaar zijn gemonteerd doch als een stralenkrans. En concaaf of holrond, omdat de middelste pedaal lager ligt dan de beide uiterste pedalen. Het verschil ligt in de orde van grootte van 8 cm. In beide standaarduitvoeringen is overigens het gehele pedaal aan het manuaal gekoppeld. In het verleden was dat anders. Voorts ligt in Europa de c^1-pedaal onder de c^2-manuaal, in Amerika daarentegen onder gis^1-manuaal. De Amerikaanse beiaardier zit dus anders voor zijn klavier dan zijn Europese collega.

Opmerkelijk is dat bij het Amerikaanse klavier de manualen en de diatonische pedalen langer zijn dan bij de Europese standaard (612 resp. 584 mm). In overeenstemming daarmee is de iets grotere afstand van het punt waar de draad wordt ingehaakt tot dat draaipunt van de toets. Beide afstanden zijn bij de Amerikaanse klavieren groter en bij de Europese kleiner. De hefboomwerking bij de Amerikaanse klavieren is derhalve duidelijk gunstiger, wat een minder inspannend bespelen moet bewerkstelligen. Anderzijds zou dit kunnen betekenen dat op een Amerikaans klavier met grotere oplettendheid genuanceerd moet worden dan op het Europese type. Dit alles wordt nog eens versterkt door het feit dat het Amerikaanse klavier een geringere diepgang heeft dan het Europese (40 resp. 55 mm). Hierbij wordt onder diepgang de afstand verstaan waarover een klavierstok of een pedaal omlaag kan worden gedrukt. Die afstand wordt gemeten ten opzichte van de regel waar de ingedrukte toets tegenaan stuit.

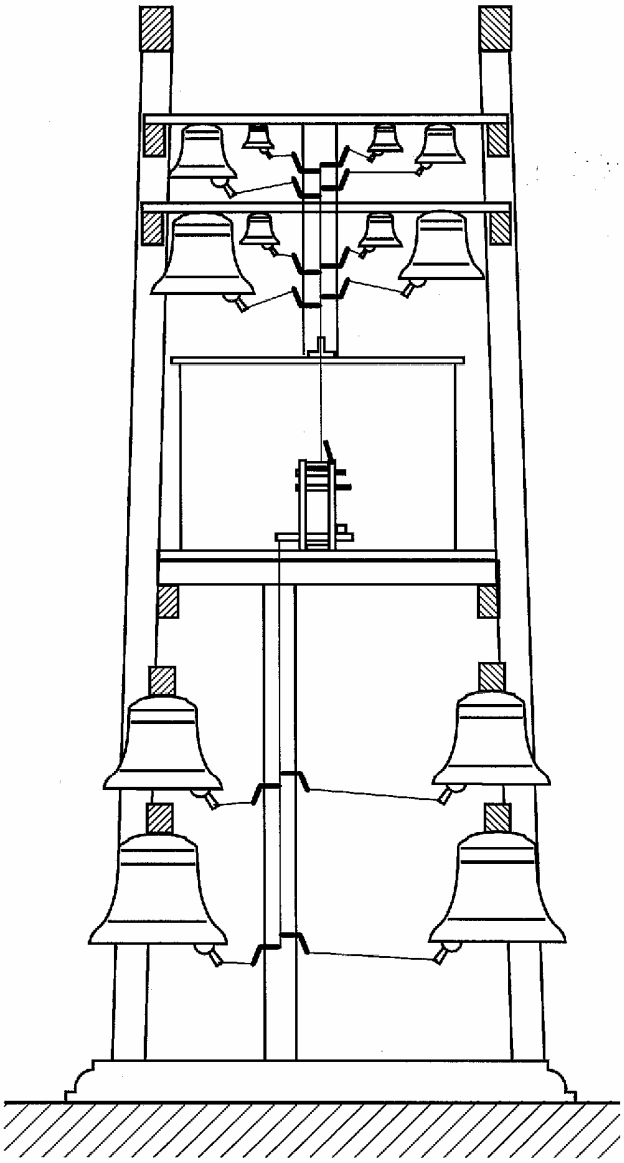
Op grond hiervan, maar ook gezien het doorgebogen pedaal, beroepen de Amerikanen zich op het feit dat hun klavier gebaseerd is op de ergonomische principes. En dat lijkt terecht, want duidelijk is daarin het streven naar gemakkelijke bespeelbaarheid te herkennen.

Intussen blijkt keer op keer dat het eindpunt in de discussies nog lang niet bereikt is. De laatste keer was dit tijdens het Vijftiende Beiaard Wereldcongres in juli 2006 te Gdansk. Een belangrijk besluit was om enerzijds reeds bestaande oude klavieren niet integraal te verwerpen, doch wel te streven naar een standaardklavier voor alle nieuwe of gerestaureerde beiaarden waar ook ter wereld, dus in plaats van de Amerikaanse of Europese standaard. Voor de eerste keer wordt ook voor één maat een keuzemogelijkheid geboden en wel voor de diepgang. Amerikanen en Europeanen hebben elkaar dus niet in een gemeenschappelijk maat gevonden en daarom vastgesteld dat de diepgang tussen 30 en 45 mm moet liggen. Maar voor het overige is gestreefd om de voordelen van elk klavier in het gemeenschappelijke, in de nieuwe standaard dus, op te nemen. Wij zullen niet alles opsommen, doch alleen nog opmerken dat in dit klavier de c^1 ten naaste bij onder de fis^1 ligt, ten naaste bij omdat dit bij een waaiervormig pedaal moeilijk te definiëren is. Voorts wordt uitgegaan van een vijf-octaafs klavier, wel erg omvangrijk en slechts voor enkele beiaarden realiteit. Daarnaast loopt het pedaal van g-chroatisch-c^3, dus over twee octaven en een kwart. Voor een vijf-octaafs beiaard moge dat geen bezwaar zijn, doch wat te doen als er slechts drie of vier octaven zijn? Kortom, er blijft genoeg discussie voor de toekomst!

Opmerkelijk is dan in de discussie uitvoerig over maten en afmetingen wordt gesproken, doch niet of nauwelijks over een lichte of zware bespeelbaarheid van het klavier. Maar ook de tegendruk in de toetsen die daarvoor verantwoordelijk is, dient een onderwerp van het debat te zijn. Daarin is dan ook geen enkele eenheid te bespeuren. Sommigen verdedigen de stelling dat de bovendruk in het klavier, dus de druk die de beiaardier ondervindt wanneer hij de toets indrukt, althans vanaf het tweede octaaf nul dient te zijn. Anderen zijn het daar niet mee eens en verlangen toch enige tegendruk, bijvoorbeeld enkele honderden grammen. Ook de onderdruk is belangrijk. Zeker is dat bij het omlaag drukken van de toets die druk moet toenemen en maximaal dient te zijn wanneer de toets helemaal omlaag is gedrukt. De druk op dat moment is de onderdruk. Deze kan bij de zwaarste klokken, bijvoorbeeld een c^1 van 2300 kg, gemakkelijk oplopen tot 1 kg, reden genoeg om dan het pedaal te gebruiken. Bij kleinere discantklokjes zal die te gering blijven, zodat veren in dit gebied altijd noodzakelijk zijn.

10.7 De bouw van een beiaard

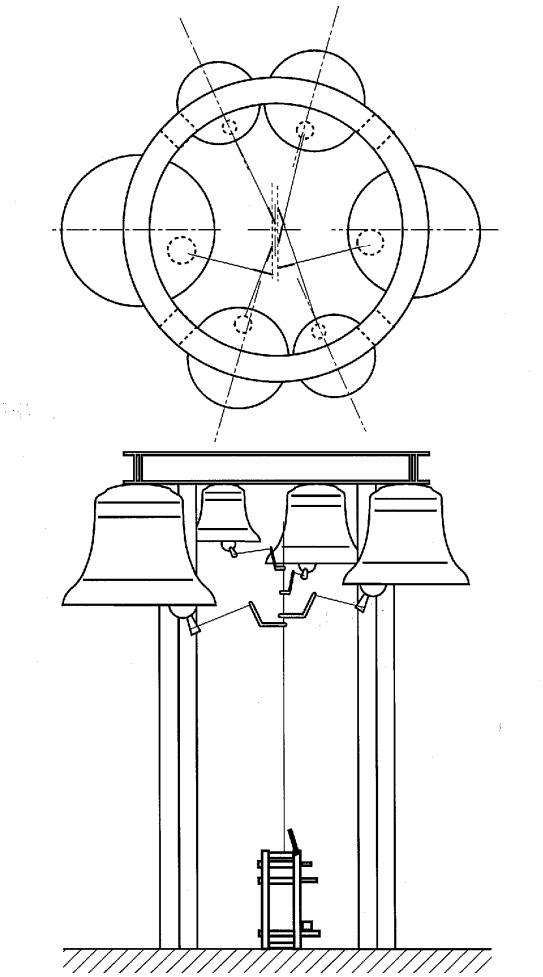
Hoewel het thans voor de hand zou liggen om eerst de automatische speelwerken te behandelen, is het wellicht beter een klein intermezzo in te ruimen voor de vraag hoe klokken, verbindingen en klavier tot één instrument worden verenigd. Er ontbreekt immers nog de beiaardstoel, het houten dan wel ijzeren frame waarin de klokken opgehangen worden. Het zal vanzelfsprekend duidelijk zijn dat bij zo'n stoel niet alleen bepaalde constructieve, doch ook akoestische regels in acht genomen dienen te worden. Laatstgenoemde zullen overigens afzonderlijk in hoofdstuk 11 behandeld worden. Hier moge alvast opgemerkt worden dat een compacte bouw, dus met de klokken zo dicht mogelijk opeen, onder alle omstandigheden te prefereren is. Alleen dán zullen de klokken tezamen als een muziekinstrument gewaardeerd kunnen worden. Niets immers is storender dan wanneer men kan horen wáár de klokken in de klokkenkamer hangen. Men denke zich bijvoorbeeld de situatie in waarbij van een grote drieklank de c^2 in het midden van de toren hangt, de e^2 ergens achter en de g^2 helemaal vooraan en daardoor in het akkoord dominerend. Maar helaas wordt dat door sommige architecten die



Figuur 70: Grote beiaard met handspel.

met beiaardbouw te maken hebben óf niet beseft óf niet aanvaard!
Anderzijds mag die compacte bouw natuurlijk niet in het extreme doorgevoerd worden, en dus niet tot een situatie leiden waarin onderhoud aan afzonderlijke klokken onmogelijk is geworden. En ook dat onderhoud is van eminent belang. Een draad kan wel eens breken, een repetitieveer dient soms bijgesteld te worden, de ophangbouten van een klok gecontroleerd te worden en wat al niet meer. Vanuit die situatie is de bereikbaarheid van alle klokken een dwingende noodzaak, een bereikbaarheid die overigens niet alleen gerealiseerd kan worden door middel van voldoende ruimte tussen de klokken of klokkenrijen, doch bovendien, waar nodig, door middel van ladders, klimijzers en loopplanken.
Een compacte beiaardbouw heeft tenslotte ook nog een speeltechnisch voordeel. Het zal immers duidelijk zijn dat een klokkenspel des te gemakkelijker te bespelen is, dat wil zeggen dat de beiaardier zijn spel des te beter onder controle kan houden, wanneer de draadverbindingen zo kort mogelijk zijn. Lange draadverbindingen kunnen namelijk tijdens een bespeling gaan slingeren, waardoor spelcontrole dikwijls moeilijk wordt. In het bijzonder geldt dit voor kleine klokjes. Om die reden streeft men ernaar de klepeldraden van discantklokjes niet langer dan twee meter te maken tegen de klavierdraden maximaal vijf meter. Wordt die afstand groter, en er kunnen zich situaties voordoen dat dit onvermijdelijk is, dan is het aan te bevelen niet alleen een veer achter de klepel te plaatsen, doch bovendien een boven de klavierdraad zodat deze gespannen wordt (zie 10.3).

Uit het bovenstaande volgt dat de kleinste klokjes het dichtst boven het klavier moeten hangen. De in grootte daaropvolgende komen daar weer boven te hangen, dan wel bezijden. In het eerste geval zijn dan de klavierdraden langer, in het tweede geval de klepeldraden langer dan bij de discantklokjes. Voorts is het allerminst ongebruikelijk om althans de basklokken onder het klavier te hangen.



Figuur 71: Kleine beiaard in lantaarntoren.

Met dit alles moge het enigszins duidelijk zijn geworden dat bij de bouw van een beiaard de eisen die het instrument stelt primair dienen te zijn. Nimmer mogen ten koste van het instrument visuele of architectonische wensen prevaleren. Het lijkt een logische uitspraak, doch helaas zijn velen te onbekend met deze materie om dit zonder meer zó te kunnen of te durven aanvaarden. Vanuit dit tekort aan kennis van het muziekinstrument dat de beiaard toch is, meent men bijvoorbeeld in een enigszins open toren de klokken in de eerste plaats als een esthetisch element te mogen gebruiken. Het komt ook wel voor dat het klavier op een onmogelijke afstand van de klokken geplaatst wordt onder het motto dat de draden ook dan wel het karwei zullen klaren. Alsof een bespeling zich beperkt tot het ongecontroleerd aanslaan van klokken.

De klokkenstoel zelf wordt meestal uit constructie-ijzer gemaakt. Nochtans is een houten stoel steeds aan te bevelen, althans, wanneer daar voldoende ruimte voor beschikbaar is. Akoestisch is het namelijk een bijzonder aantrekkelijk materiaal. Om die reden maakt men wel eens de ophangbalken uit hout en de staanders omwille van het kostenaspect uit ijzer.

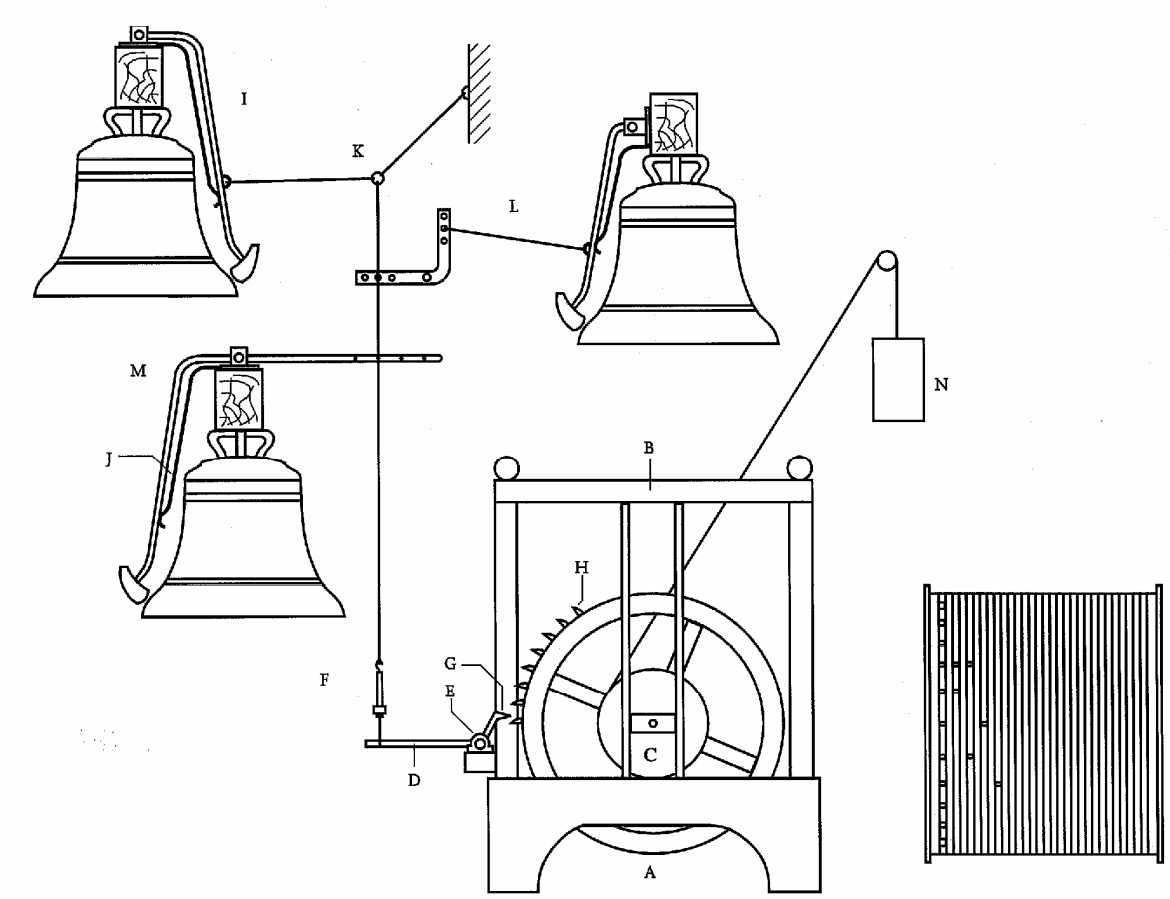
Het klavier moet steeds in een afgesloten ruimte staan. Is het niet mogelijk daar in de toren zelf een natuurlijke ruimte voor te vinden (fig.71), dan moet een voor dit doel vervaardigde houten cabine geplaatst worden (fig.70).

Tenslotte hebben wij twee zéér karakteristieke bouwmogelijkheden gegeven (fig. 70 en 71). Opgemerkt zij daarbij dat in die tekeningen het automatisch spel is weggelaten, terwijl omwille van de duidelijkheid lang niet alle klokken zijn getekend. In principe behoeft dat echter niet van wezenlijke invloed te zijn, hoezeer ook deze ruimte vragen. Figuur 70 geeft een voor- en zijaanzicht van een grote beiaard in een dienovereenkomstige toren. Midden in de stoel is de cabine met klavier geplaatst. Daarboven hangen, zoals beschreven, de kleine en kleinere klokken, daaronder de basklokken. Men merke op dat de pedalen van die bassen achter hun draaipunt verlengd zijn en de verticale armen van de tuimelaars naar beneden zijn gericht. Immers, alleen op die wijze zijn de klepels van deze klokken aan te trekken. Het zal voorts duidelijk zijn dat wanneer de basklokken weggedacht worden, of in het bovendeel worden geplaatst, de cabine op de vloer kan staan. Het is een uitvoering die vooral voor lichtere beiaarden geprefereerd wordt.

In figuur 71 geven wij een tegengestelde situatie. Aldaar gaat het om een betrekkelijk kleine toren waarin de klokken in de openingen tussen de stijlen moeten hangen, terwijl het klavier onder de vloer van het klokkenplat is geplaatst. Het spreekt vanzelf dat bij deze opstelling alleen broeken of gerichte tuimelaars in aanmerking kunnen komen, althans voor klokken die in de vensters hangen. Dit dan in tegenstelling met de opstelling uit figuur 70 waarin tuimelaarassen het meest op hun plaats zijn.

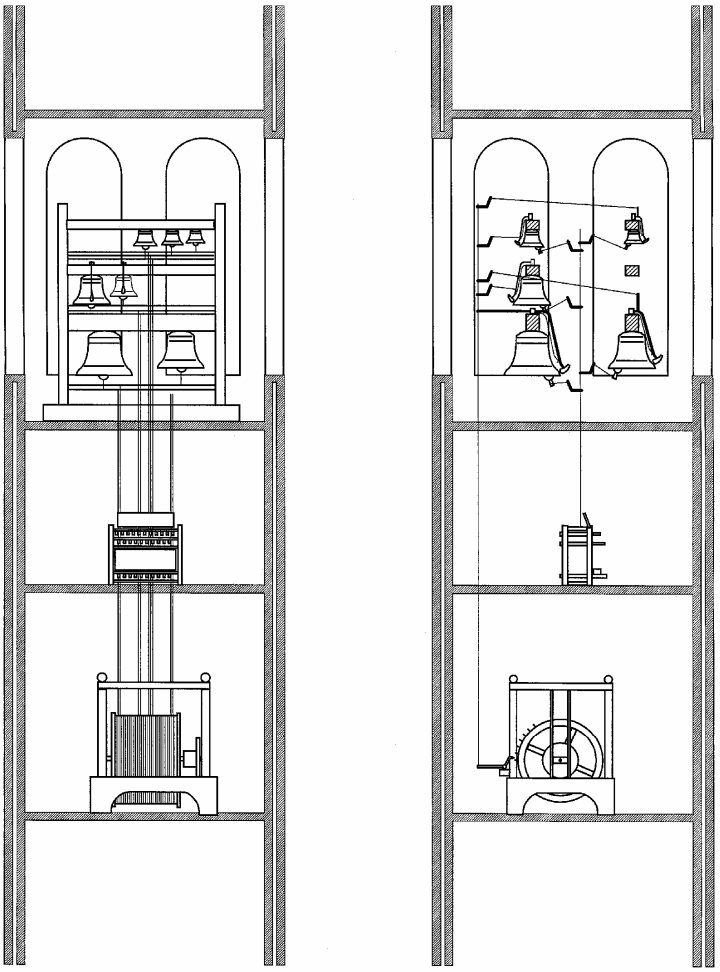
10.8 Het trommelspeelwerk

Het *trommelspeelwerk* of *mechanisch spel* heeft tot doel de beiaard elk kwartier langs automatische weg een melodie te laten spelen. Op het heel en op het half uur wordt deze melodie doorgaans gevolgd door de uurslagen op de zwaarste klok van de beiaard dan wel de halfuurslagen op een klok die gewoonlijk een kwartinterval hoger gekozen wordt. De duur van het automatisch spel kan globaal gesteld worden op ruim één minuut voor het heel uur, de helft van die tijd voor het half uur en tien tot twintig seconden voor elk der kwartieren.



Figuur 72 Trommelspeelwerk met verschillende typen verbinding.

In tegenstelling met het handspel dat met klepels werkt, bedient het automatisch spel zich van hamers op de buitenkant der klokken. Hun gewicht kan al naar gelang de inzichten variëren tussen 1 en 5% van het klokgewicht ofschoon voor het bas- en middenregister 3% regel is. Ze worden gedirigeerd vanuit het trommelmechanisme. In figuur 72 is dat schetsmatig weergegeven. A is een grote holle cilinder met een diameter en breedte die kan liggen tussen één en twee meter. Hij is vervaardigd uit gietijzer of messing opgebouwd dan wel uit gesmede ijzeren strippen. Deze cilinder, die gewoonlijk de *speeltrommel* of *trommel* wordt genoemd, is opgenomen in een ijzeren frame B waarin hij kan ronddraaien in de aangegeven richting. Hij steunt daartoe in de lagers C. Direct vóór de trommel, of ook wel boven de trommel, is een reeks *lichters* of *trekkers* D gemonteerd die tezamen het *trommelklavier* of *lichterbed* worden genoemd. Elke lichter kan individueel kantelen om as E. Daarbij is de hefboomverhouding doorgaans op 1:3 gesteld. Aan de lange zijde is de hamerdraad verbonden. In de hamerdraad. onmiddellijk boven de lichter, is een spanwartel, de draadregelaar F aangebracht teneinde de juiste lengte te kunnen instellen waardoor de hamer op correcte wijze tegen de desbetreffende klok zal vallen. In de korte zijde van de trekker is een gehard stalen bekken G aangebracht. Het geheel is zodanig gemonteerd dat deze de trommel net niet raakt.



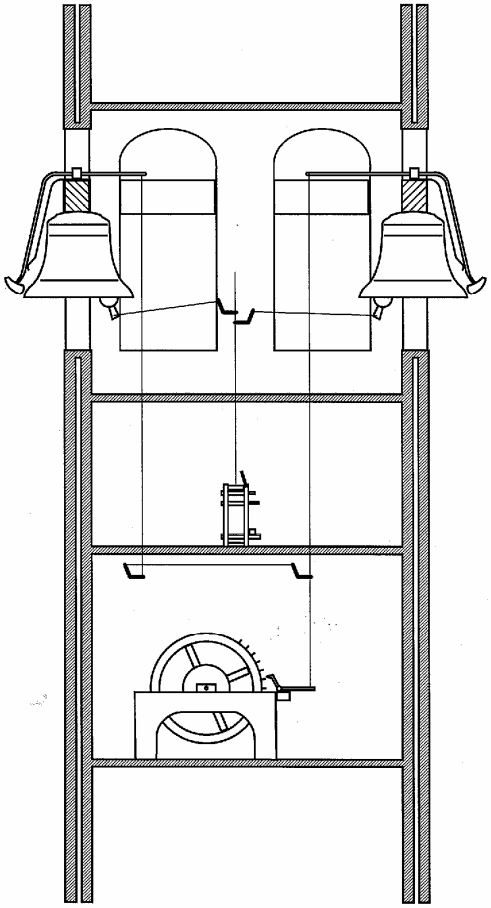
Figuur 73: Grote beiaard met klavier en trommel.

De trommel zelf is voorzien van talloze vierkante dan wel ronde gaten. In de figuur zijn die slechts voor een deel getekend. Staat men recht voor de trommel (rechts in fig.72) dan ziet men een zeker aantal verticale banen die rondom de trommel lopen. Voor elke baan ligt een trekker. Indien derhalve in een gaatje een ijzeren stift, nootje H genaamd, wordt vastgeschroefd en indien vervolgens dat nootje tijdens het ronddraaien van de trommel de lichter passeert, dan zal die lichter om E kantelen, de hamerdraad derhalve naar beneden trekken en als consequentie daarvan de hamer van de klok lichten. Na het passeren van het nootje zal de lichter weer in zijn oorspronkelijke positie terugvallen zodat de hamer eveneens terugvalt en de klok aanslaat. De hamer mag natuurlijk niet op de slagring van de klok blijven rusten. Om die reden is onder de

hamersteel een lange ijzeren bladveer J aangebracht. Deze heeft een zodanige veerkracht dat de hamer in rustpositie vrij van de klok blijft, doch na lichten door die veer heenvalt om vervolgens direct daarna weer in zijn oorspronkelijke stand terug te keren.

Zoals men ziet, zijn er verschillende uitvoeringen voor het hamermechaniek. Men bedenke bij figuur 72 dat de verticale trekkerdraad van elke hamer naar zijn lichter voor de trommel uiteraard samenvalt met de twee andere. De meest simpele constructie (twee links hangende klokken) bestaat hieruit dat de hamersteel draaiend is gemonteerd tegen de zijkant van de balk of daar bovenop. De draad wordt dan ergens in de buurt van het eigenlijke hamerlichaam vastgemaakt. Ook is het mogelijk de hamersteel over de klok te laten uitsteken (rechter klok). In dat geval is vanzelfsprekend een broek of tuimelaar overbodig geworden. In feite is de hamer dan zelf tuimelaar geworden.

Evenals bij het handspel zijn ook bij speelhamers meerdere overbrengingen mogelijk. K heeft een broek, L een tuimelaar, hetzij gericht, hetzij als tuimelaaras uitgevoerd, en M de eerder genoemde overstekende hamersteel.



Figuur 74:Midelzware beiaard met klavier en trommel.

De aandrijving van de trommel geschiedt, zo dit niet door middel van een motor gebeurt, met behulp van een gewicht N dat aan de gewichtstrommel P verbonden is. Belangrijk is dan nog de momenten vast te stellen waarop de trommel kan gaan draaien. Zoals gezegd, is het gebruikelijk per kwartier, hoewel ook wel trommels bestaan waar dit per 7½ minuut plaats vindt. Op zo'n halve kwartier worden dan enkele tonen gehoord. Het staat bekend onder de naam *klik*.

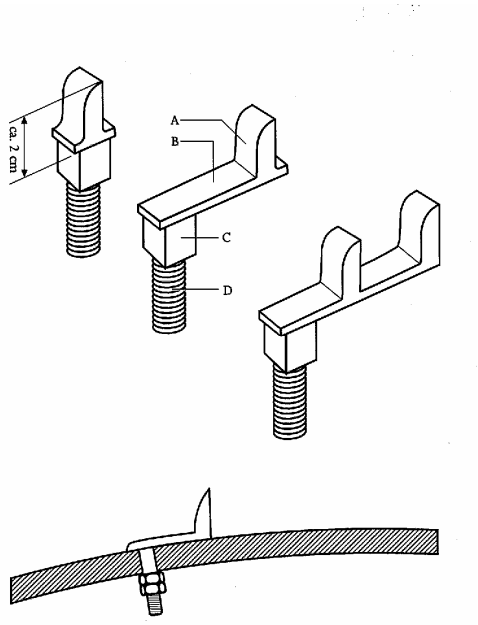
Het deblokkeren van de trommel waardoor deze kan gaan draaien, wordt in het torenuurwerk geregeld. Dikwijls is dat uurwerk, evenals de mechanieken voor de slagwerken ondergebracht in hetzelfde frame waarin de speeltrommel is gemonteerd. Het eigenlijke inschakelen geschiedt door middel van een palmechanisme, evenals overigens het stopzetten van de trommel. Vanzelfsprekend kan dit ook langs elektrische weg.

Nu thans ook de hoofdzaken van een trommelspeelwerk behandeld zijn, is het interessant de consequentie van dit onderdeel op de opstelling van een beiaard te onderzoeken. In figuur 73 hebben wij daartoe een beiaard gekozen die uitsluitend met tuimelaarassen is uitgevoerd. Een zij- en rechter vooraanzicht tonen op welke wijze.

In de klokkenkamer is tegen de klokkenstoel aan de linkerkant het tuimelaarrek voor het automatisch spel gemonteerd en in het midden dat voor het handspel. Laatstgenoemde loopt derhalve niet verder dan tot in de klavierruimte, dat van het mechanisch spel gaat een verdieping lager waar de trommel staat opgesteld. Het vooraanzicht toont nog eens ten overvloede dat in dit aanzicht de tuimelassen domineren. Overigens behoeven die natuurlijk niet allemaal over de gehele breedte van de stoel te lopen. Voldoende is dat zowel het aanhechtpunt van de klepeldraad als van de klavierdraad door de bijbehorende as omspannen wordt. Anderzijds is het natuurlijk wat overdreven om elke tuimelaaras zijn strikt eigen lengte te geven. Gebruikelijk is om telkenmale een geschikt aantal te combineren.

Hoe logisch en bevredigend de opstelling uit figuur 73 ook is, helaas zijn er maar al te veel torens waarin dit niet gerealiseerd kan worden. Een voorbeeld daarvan is in figuur 74 gegeven. In die toren hangen de klokken, althans de grotere, in de vensters. De klepels worden door middel van gerichte tuimelaars met hun draden boven het klavier geleid. Voor de trommel schijnt dit, althans in die ruimte, niet wel mogelijk. Om die reden zijn hamers met overstekende stelen gebruikt. Aldus gaan de draden direct achter de klokken naar beneden, naar de trommelkamer. Daar kunnen ze dan door middel van gerichte tuimelaars, of desgewenst broeken, boven het trommelklavier geleid worden. Bij de rechtse klok was dat niet nodig, bij de linkse waren twee tuimelaars nodig. Overigens lijkt dit alles een vrij ongecompliceerde situatie. In werkelijkheid echter hangen in de toren heel wat meer klokken dan die enkele die getekend zijn. Vaak is dan ook heel wat vindingrijkheid nodig om alles op zijn pas en plaats te krijgen. Dikwijls wordt daarom voor het automatisch spel het broeksysteem gebruikt. Zulks is allerminst verwerpelijk omdat het trommelspeelwerk relatief traag werkt zodat de bezwaren die vanuit het handspel voor broeken gelden voor automatisch spel nauwelijks van kracht zijn.

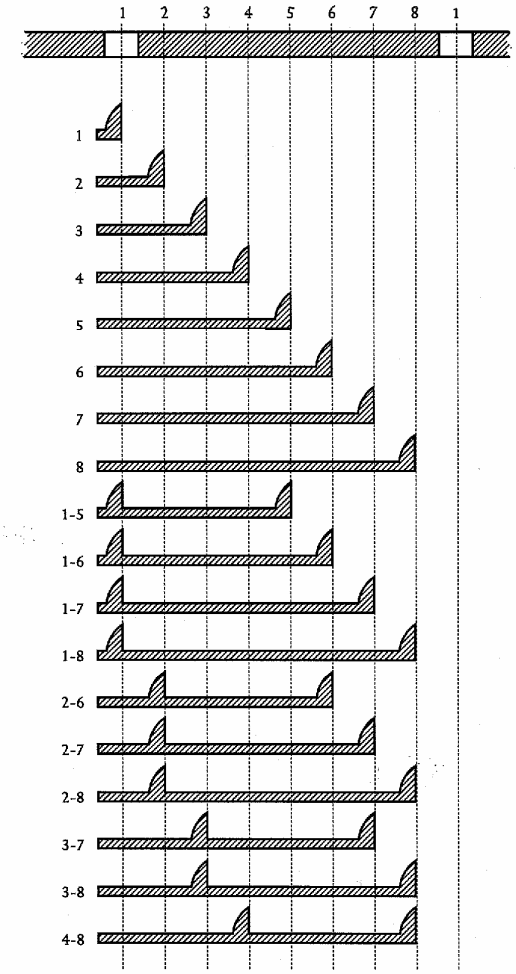
10.9 Het versteken met vaste nootjes



Figuur 75: Vaste nootjes en doorsnede van een deel van de trommel.

Wanneer een trommel van *toonstiften* of *nootjes* is voorzien en die nootjes worden verplaatst, in andere gaten gestoken, teneinde een nieuwe melodie te maken, noemt men dat *versteken*. Het resultaat is de *versteek*.

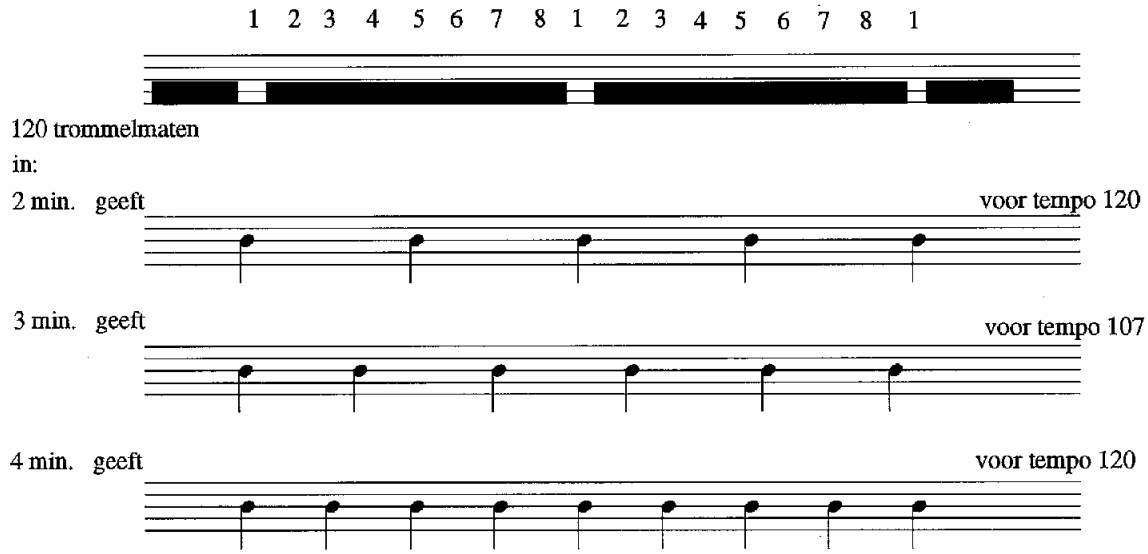
In figuur 75 is een en ander aanschouwelijk voorgesteld en ten dele in perspectivisch zicht afgebeeld. In de eerste plaats ziet men enkele nootjes uit de variëteit die mogelijk is en later besproken zal worden. Men onderscheidt het *bekken* A dat uit gehard staal bestaat omdat dat bekken over dat van de lichter moet schuiven. In de tweede plaats is daar de *brug* B die op het oppervlak van de trommel rust. *Hals* C past precies in het vierkant gat van de trommelwand, terwijl de toonstift tenslotte wordt vastgezet door middel van een moer die aan de binnenzijde op het draadeinde D wordt vastgeschroefd. Onder in figuur 75 ziet men dit alles ook nog in doorsnede uitgebeeld.



Figuur 76: De mogelijke nootjes bij een verdeling van de trommelmaat in achten.

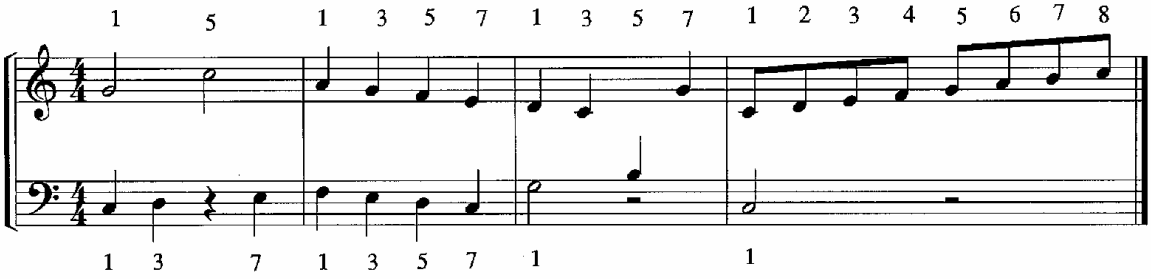
Elke noot die op de trommel wordt geplaatst, heeft zijn vaste positie die ten opzichte van de gaten bepaald wordt door de lengte van de brug. Vandaar dat men spreekt over *vaste toonstiften*. Het woord vast heeft derhalve allerminst betrekking op het feit als zouden de nootjes onwrikbaar in de trommel vast zitten. Dit type toonstift is bovendien steeds van een vierkante hals voorzien, zodat de trommel *vierkante gaten* moet bezitten. Vandaar dat men ook wel spreekt van trommels met vierkante gaten in plaats van trommels met vaste nootjes. Het gaat dan altijd over historische trommels.

In figuur 75 ziet men voorts een toonstift met twee bekkens. Deze wordt gebruikt in het geval dat binnen dezelfde trommelmaat de desbetreffende klok opnieuw moet worden aangeslagen. Vandaar deze *combinatienootjes*, die overigens in allerlei typen beschikbaar zijn. Het zal vanzelfsprekend duidelijk zijn dat dit herhaald aanslaan niet ongelimiteerd mogelijk is. De hamer moet immers tijd krijgen om in zijn oorspronke-



Figuur 77: De invloed van de omlooptijd van de trommel.

lijke rustpositie terug te keren. Aan de repetitie zijn derhalve grenzen gesteld, grenzen die over het algemeen niet stroken met de eisen die de muziek stelt. Vandaar dat de meest gebruikte klokken twee, ja soms zelfs drie hamers krijgen. Wanneer dan namelijk de eerste hamer bezig is naar zijn rusttoestand terug te keren, kan de volgende al vast gelicht worden. Als vuistregel wordt in het algemeen gesteld dat het totaal aantal hamers dubbel zoveel moet zijn als het aantal klokken. Dienovereenkomstig is ook het aantal trekkers op de trommel bepaald, hoewel het wel eens een enkele keer voorkomt dat er méér hamers dan trekkers zijn. Bij een nieuwe versteek kan de beiaardier dan een paar hamers van bepaalde klokken loshaken en vervangen door een gelijk aantal van andere klokken. Heden ten dage is het overigens een ongebruikelijke procedure die alleen nog wordt toegepast wanneer de trommel te klein is voor het beschikbare aantal klokken.



Figuur 78: Een eenvoudige versteek zonder combinatienootjes.

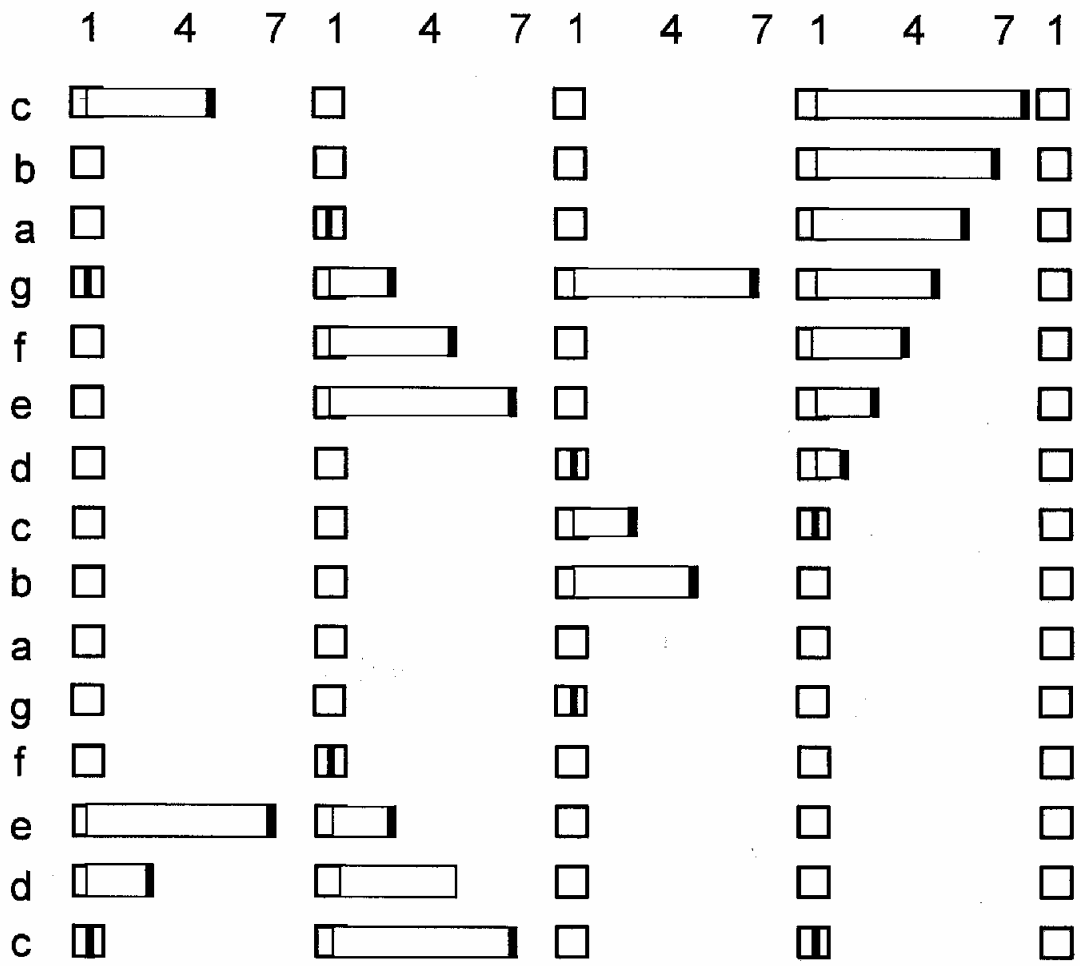
Hoewel bij de hamerverdeling van een automatisch klokkenspel de inzichten van de betrokken musicus een rol spelen, mag men in het algemeen toch wel stellen dat bij een drie octaafs speelwerk (35 klokken) de bassen één hamer krijgen, zij met uitzondering van enkele veel gebruikte tonen die er twee krijgen, klokken uit het middenregister twee hamers, maar met uitzondering van de veel gebruikte die er drie krijgen en de discantklokken tenslotte eveneens twee, zij het ditmaal met uitzondering van de minder vaak gebruikte klokken die er slechts één krijgen.

De hamerverdeling wordt op een zogenoemde *versteeklat* genoteerd. Deze wordt bij het versteken vóór de trommel gelegd zodat men precies weet welke klokhamer correspondeert met welke trommelbaan in de omtrek.

Het zal natuurlijk duidelijk zijn dat in de omtrek van de trommel de onderlinge afstand van de nootjes niet alleen afhankelijk is van het tempo van de gekozen muziek doch bovendien van de omtreksnelheid van de desbetreffende trommel. Draait de trommel namelijk snel rond dan zullen de toonstiften relatief ver van elkaar geplaatst moeten worden, en omgekeerd. Genoemde trommelsnelheden zijn echter allerminst genormaliseerd. De duur van een volledige omwenteling kan namelijk variëren tussen twee en vier minuten. Als een goed gemiddelde kan men daarom drie minuten aanhouden. Vervolgens dient men te weten hoeveel gaten er in de omtrek, dus per baan, voorkomen. Ook dit aantal varieert bijzonder sterk, van minder dan 100 tot 180. Het spraakgebruik wil dat de afstand tussen twee gaten een maat genoemd wordt. Het suggereert dat genoemde afstand overeenkomt met een muziekmaat. Vanzelfsprekend is dat onjuist. Beter is dan ook over *trommelmaat* te spreken, om verwarring te voorkomen. De-

ze trommelmaat wordt meestal in acht gelijke parten verdeeld, of anders gezegd, er zijn zoveel typen nootjes dat er acht maatintervallen binnen een trommelmaat gerealiseerd kunnen worden.

In figuur 76 zijn bedoelde nootjes op schematische wijze weergegeven. Bovenaan ziet men een rechtgetrokken deel van de trommel, begrensd door twee gaten. De verticale lijnen daaronder geven de verdeling in achten aan waarbij geteld wordt vanaf het begin van de

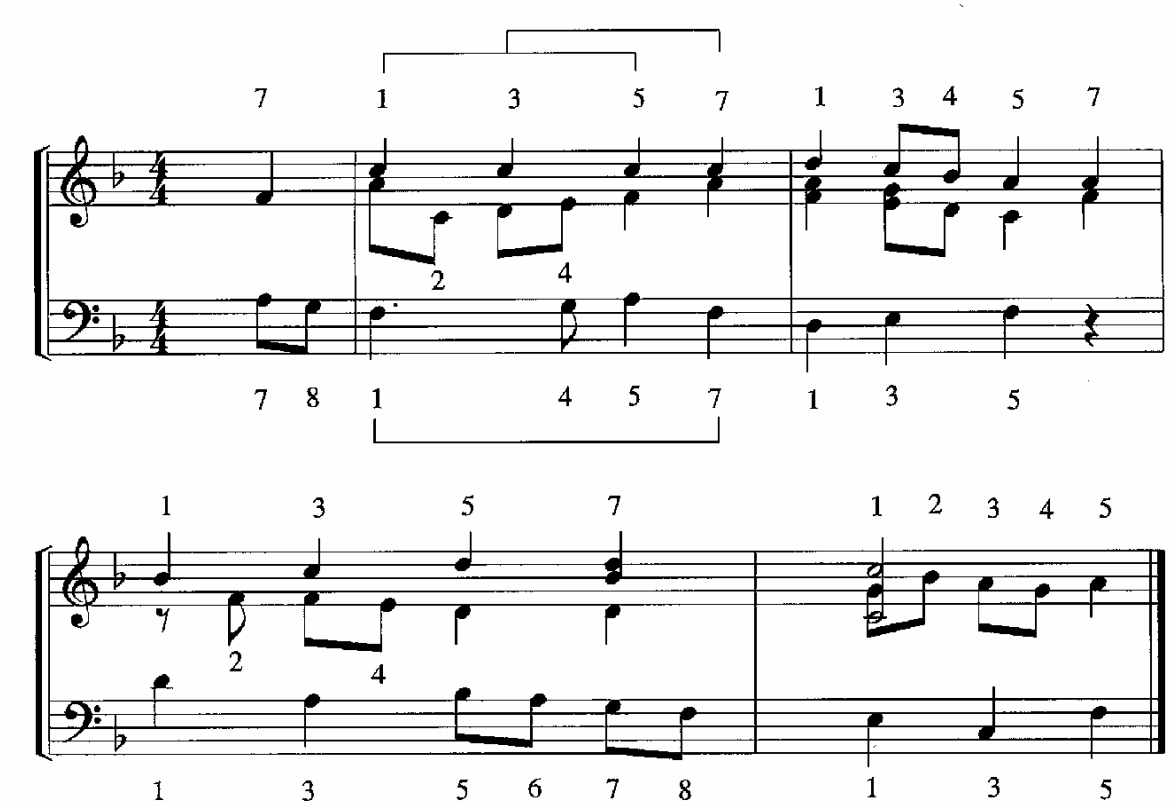


Figuur 79: De versteek van fig.78 op het trommeloppervlak.

trommelmaat, een telling waaraan ook de nootjes hun naam ontlenen. Zo is een eentje een nootje dat recht boven het gat de lichter laat kantelen, een tweetje een achtste verder, een drietje twee-achtste verder enz. tot en met een achtje dat 7/8 na het begin van de trommelmaat de hamer laat vallen.

In principe zou men dus genoeg hebben aan acht typen toonstiften. Combinatienoten blijken echter bijzonder nuttig zijn. Vandaar dat deze altijd aanwezig zijn. Daarbij moet er natuurlijk op gelet worden dat de twee bekkens van een combinatienoot niet te dicht bij elkaar staan, zulks om te voorkomen dat de hamer geen gelegenheid krijgt om in zijn rustpositie terug te keren vooraleer opnieuw gelicht te worden. Bij de meeste trommels dient die afstand de

helft van de trommelmaat te zijn, hoewel er ook zijn waarbij zelfs 3/8 deel van die maat mogelijk is. Hier echter zullen wij ons beperken tot vier achtste parten. De toonstift 1-5 laat derhalve de hamer afvallen op de eerste tel van de trommelmaat en vervolgens nog eens op de vijfde. De noot 2-8 resp. op de tweede tel van de trommelmaat en daarna nog eens op de achtste. Gemakkelijk is in te zien dat in figuur 76 alle mogelijke combinatienoten gegeven zijn. Het betekent dat voor een trommel waarvan de maten in achten worden onderverdeeld, niet meer en niet minder dan achttien soorten nootjes nodig zijn.



Figuur 80: Een versteek met combinatienootjes.

Hoe wordt dit alles tenslotte in praktijk gebracht? Figuur 77 geeft een algemeen schema. Het bovenste deel is weer een deel van de rechtgetrokken trommel, dit maal over twee trommelmaten. Stel men wil een metronoomgetal van 100-120 realiseren, dus 100-120 kwartnoten per minuut. Heeft men 120 gaten in de omtrek, dus 120 trommelmaten, en de trommel loopt in twee minuten één maal rond, dan kan men gemakkelijk berekenen dat de kwarttonen de trommelmaten moeten halveren. Bij drie minuten omlooptijd ligt het voor de hand bij kwartnoten de volgorde 1 - 4 - 7 - 2 - 5 - 8 - 2 enz. te nemen. In dit geval wordt namelijk een tempo van 107 bereikt. Immers, l½ trommelmaat bevat vier kwartnoten. De gehele trommel bevat 80 delen van 1½ trommelmaat. In de gehele omtrek kunnen derhalve 320 kwartnoten. Dit levert een metronoomgetal van 320/3, is bijna 107. In het geval dat de trommel tenslotte een omlooptijd van vier minuten heeft, zal elke trommelmaat 4 kwartnoten bij tempo 120 bevatten. Of anders gesteld, in dit tempo is de trommelmaat gelijk aan een 4/4-muziekmaat.

Het laatste is in figuur 78 en 79 voor een willekeurige zetting uitgewerkt, terwijl figuur 80 een zetting met combinatienootjes geeft. Daarbij is boven en onder de notenbalken de becijfering van de nootjes gegeven. Met ziet dat achtsten gemakkelijk gerealiseerd kunnen worden. Zestienden echter niet, althans zo lang men de trommelmaat niet in zestien delen heeft verdeeld. Bij slechts weinig trommelspeelwerken is dat daadwerkelijk het geval. Indien de trommel echter in twee minuten rondloopt (fig.77). zijn zestienden natuurlijk wel mogelijk. In het tussenliggende geval van drie minuten zou men in feite de beschikking dienen te hebben over nootjes die de trommelmaat in zestien parten verdelen. Maar ook dat komt slechts bij uiterst weinig trommels voor. Het betekent bovendien dat men aan triolen en ritardando's helemaal niet behoeft te denken. Triolen zouden overigens wel mogelijk zijn als er naast nootjes volgens een verdeling in achten ook nootjes volgens een verdeling in twaalven beschikbaar zouden zijn. Maar ook dat is zelden het geval.

Aan het probleem van de zestienden behoeft men anderzijds echter niet al te zwaar te tillen. Op vele trommels immers kunnen zestienden reeds een tamelijk troebel klankbeeld geven. De oorzaak schuilt in de ongelijke afvalling van de hamers die is terug te voeren tot versleten nootjes en een versleten lichterbed. Wanneer namelijk de hoogte van de bekkens niet exact aan elkaar gelijk zijn, en hoe snel gebeurt dat niet door slijtage, wanneer bovendien de lengtes van de bruggen niet exacte veelvouden zijn van het achtste deel van een trommelmaat, zal geen gelijke afvalling der hamers gehoord worden. Eenzelfde redenering is van toepassing op het lichterbed.

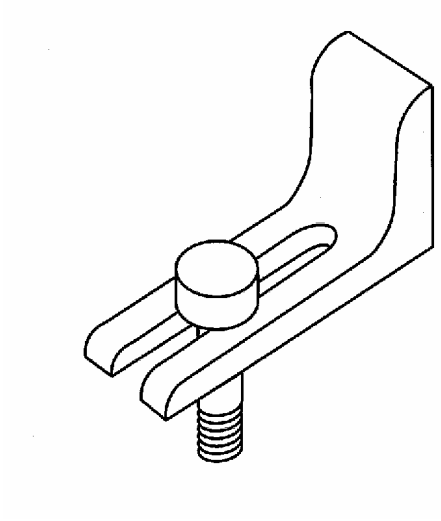
Er zijn ook nog andere beperkingen aan de trommel met vaste toonstiften. In het voorafgaande zijn bijvoorbeeld nauwelijks variaties in tempo beproefd. Bedenkende dat een trommelmaat slechts in acht stukken te verdelen is, kan men gemakkelijk nagaan dat tempovariaties alleen maar volgens een vrij grove schaal mogelijk zijn. Wel kan men aan de trommel zelf iets regelen, waarbij men natuurlijk moet bedenken dat aldus aangebrachte tempowijzigingen het tempo van elk kwartier beïnvloeden. Indien de trommel uitsluitend op een gewicht loopt, kan men dit doen door of het gewicht zelf te veranderen dan wel de bladen van de windvleugels te verstellen. Het is hier dus de luchtweerstand die een remmende werking uitoefent. Is de trommel elektrisch aangedreven, dan is meestal een inrichting aanwezig met verschillende snaarschijven zodat in de overbrenging van de motor naar de trommel wat tempoveranderingen te realiseren zijn. Meestal is dat 10% meer of minder van het normale tempo. Maar hoe dit ook zij, het trommelspeelwerk met vaste nootjes heeft zijn beperkingen, reden waarom aan de in 1892 geïntroduceerde trommels met verstelbare noten althans in muzikaal opzicht de voorkeur gegeven moet worden.

10.10 Het versteken met verschuifbare nootjes

Het meest wezenlijke bezwaar tegen een trommel met vaste toonstiften bestaat wel daaruit dat de nootjes niet op elke gewenste plaats in de trommel gestoken kunnen worden. Triolen zijn daardoor ondenkbaar geworden, evenals een ritardando. Dit bezwaar wordt in de trommel met *verschuifbare nootjes* of kortweg *schuifnoten* volledig ondervangen.

Figuur 81 toont de grondgedachte. De brug van de toonstift is vervangen door een gaffeltje waartussen een bout met moer past. Het zal duidelijk zijn dat aldus de toonstift elke gewenste positie op de trommel gegeven kan worden. Teneinde te voorkomen dat de gaffels van

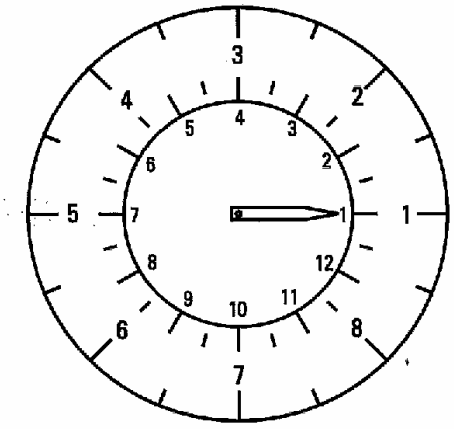
twee dicht bij elkaar te plaatsen nootjes elkaar zullen raken, heeft men bovendien de beschikking over nootjes met een lange en korte gaffel.



Figuur 81: Het verschuifbare nootje.

Ter vermijding van zijdelingse bewegingen der nootjes is elke lichterbaan als een groef van enkele millimeters diep in de trommel uitgevoerd. De breedte van die baan is juist zo groot dat het nootje er precies inpast. Dergelijke voorzieningen zijn bij een trommel met vaste toonstiften niet nodig daar de vierkante hals van het nootje zijdelingse bewegingen onmogelijk maakt. Ook het aantal gaten in de trommel is geheel anders. In plaats van de gebruikelijke 120 in de omtrek zijn dit er doorgaans drie maal zoveel, dus 360 gaatjes per baan.

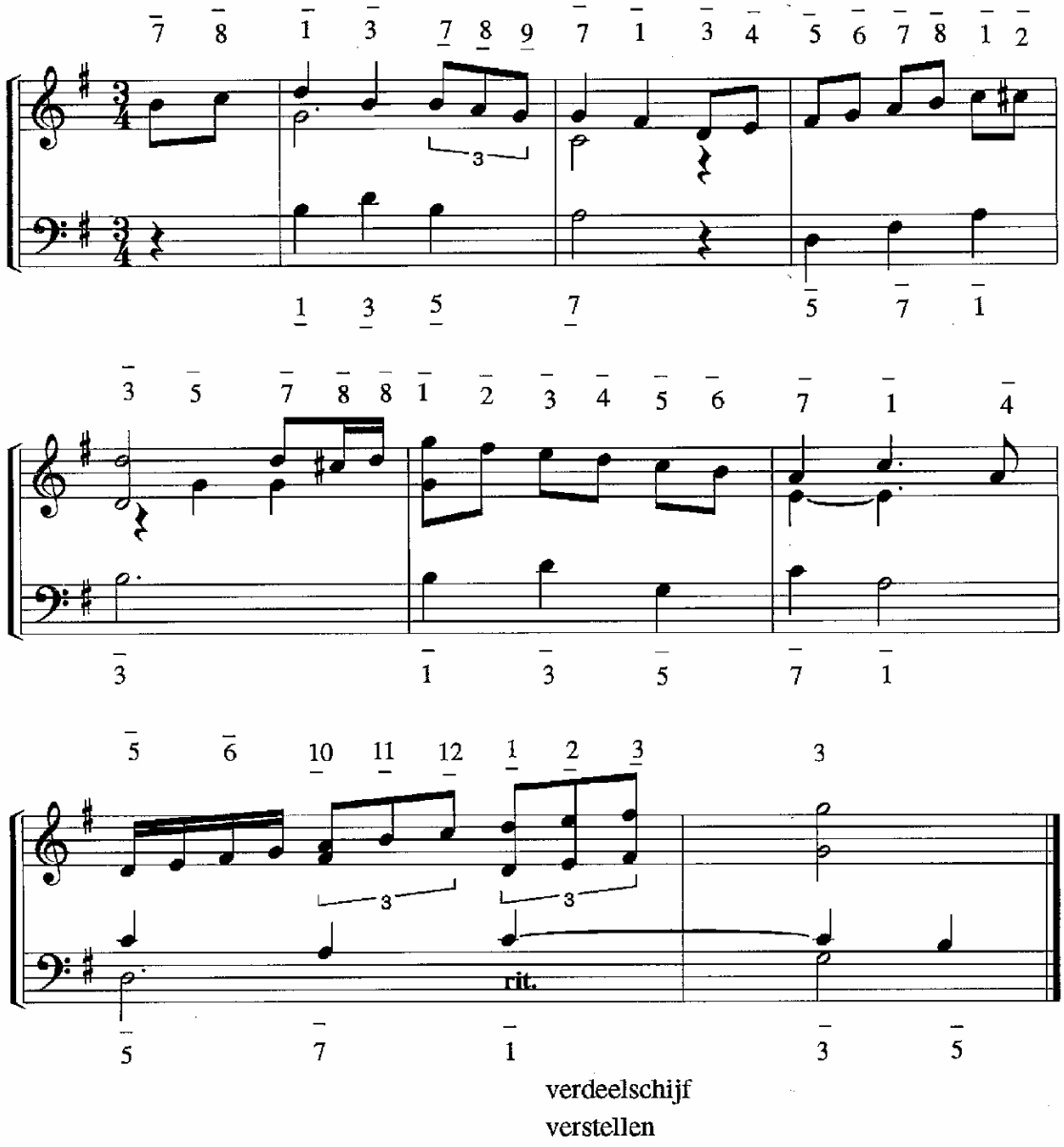
Daar de nootjes verschuifbaar ingesteld kunnen worden, dient men tijdens het steken de beschikking te hebben over een vaste aanslag. Aldus zal men ervoor kunnen zorgen dat, alle hamers in een akkoord precies op hetzelfde tijdstip afvallen. Bedoelde aanslag wordt in combinatie met de versteeklat uitgevoerd. Vóór de trommel is daarom permanent een stevige metalen strip bevestigd waarop de hamerverdeling is genoteerd. Zijn alle nootjes van een zeker akkoord gestoken dan zorgt men ervoor dat ze alle tegen die versteeklat aanliggen. Daarna kunnen ze worden vastgedraaid en de trommel doorgedraaid. Daar telkenmale de nootjes tegen de versteeklat worden ingesteld en de trommel vervolgens wordt verder gedraaid, dient men de beschikking te hebben over een inrichting waarop men kan aflezen hoeveel de trommel wordt verzet. Deze inrichting bestaat bekend onder de naam *verdeelschijf* (fig. 82). Daar elke normalisatie op dit punt ontbreekt, bestaan er verschillende typen verdeelschijven, evengoed als er meerdere methodes zijn om het basistempo van de trommel in te stellen.



Figuur 82: Verdeelschijf voor trommel met schuifnoten.

Wat het laatste betreft, men ziet gemakkelijk in dat grote afstanden tussen de toonstiften een traag tempo tot gevolg hebben. De beiaardier behoeft dat echter niet te berekenen zoals bij een trommel met vaste toonstiften. De constructeur van de trommel met verschuifbare noten heeft namelijk een inrichting aangebracht waarin het metronoomgetal van de te steken muziek ingesteld kan worden, zodat tijdens het steken de nootjes automatisch de juiste onderlinge afstanden krijgen. Ook zijn er wel trommels waar men bovendien door verandering van de tandwieloverbrenging tussen motor en trommel de snelheid van de trommel, dus het tempo van alle kwar-

tieren, naar wens kan wijzigen. Opgemerkt zij hierbij dat bij trommels met verschuifbare nootjes de gewichtsaandrijving niet meer voorkomt. De aandrijving geschiedt altijd door middel van een motor.



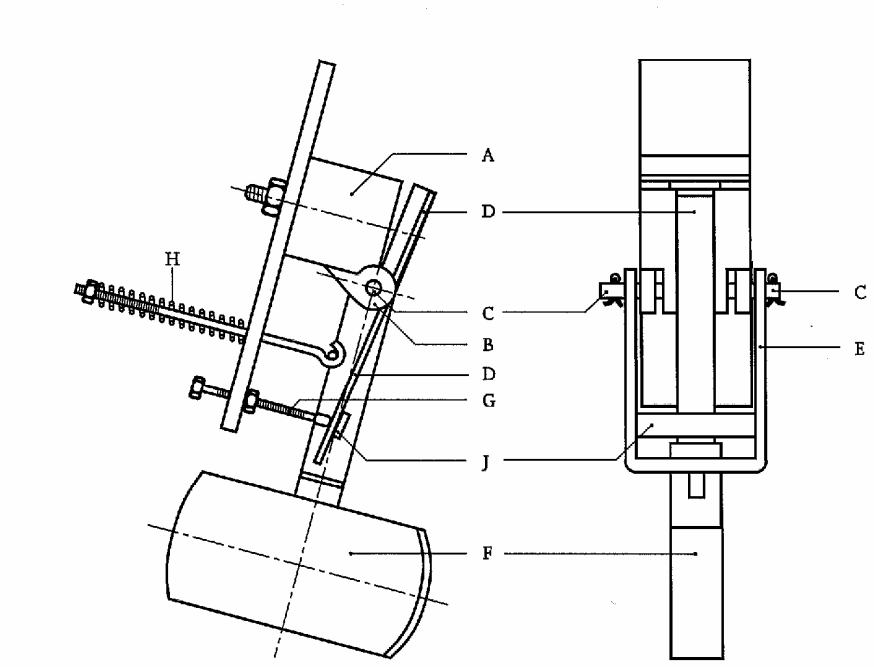
Figuur 83: Een versteek voor schuifnoten.

Het meest essentiële onderdeel voor het versteken is derhalve de verdeelschijf. De grondgedachte is daarbij de volgende. Wanneer de beiaardier met behulp van een speciaal daartoe aangebrachte hendel de trommel vooruit draait, draait een wijzer boven de verdeelschijf mee om aan te geven hoeveel kwartnoten bij het ingestelde metronoomgetal dat precies zijn. Sommige verdeelschijven zijn zodanig ingericht dat bij één omwenteling van de wijzer de trommel een kwartnoot vooruitgaat. Bij andere daarentegen komt een volledige omwenteling

van de wijzer overeen met vier kwartnoten (fig.82). Deze omwenteling in vieren, waarbij een onderverdeling in achten en zestienden is te maken, staat op de buitenomtrek van de schijf. Voor triolen heeft men echter een andere verdeling nodig. Deze is aan de binnenzijde als twaalfde delen aangebracht waarbij vanzelfsprekend een nog verdere verdeling steeds mogelijk blijft. Een triool steekt men bijvoorbeeld door de wijzer achtereenvolgens te plaatsen op 1, 2 en 3 van de binnenverdeling. Ook een ritardando is te maken. Daartoe wordt de trommel telkenmale iets meer dan een kwartnoot doorgedraaid. Om fouten te vermijden eist deze toenemende verlenging van de kwartnoot grote oplettendheid. Er zijn echter speelwerken waarbij de verdeelschijf frictief op zijn as is bevestigd. Aldus kan men, nadat de vergrote kwartnoot is ingesteld, de verdeelstreep weer tegenover de wijzer terugbrengen. In figuur 83 hebben wij tenslotte een eenvoudig voorbeeld van de becijfering bij verschuifbare noten gegeven. Hierbij geven de cijfers met een streep erboven de buitenverdeling aan, met een streep eronder de binnenverdeling.

Nog een laatste opmerking tenslotte. Bij verschillende speeltrommels met verschuifbare noten en een enkeling met vaste noten heeft men de toonstiften soms onderverdeeld in stiften met normale en iets lagere bekkens. Daarmee wordt bereikt dat de afvalhoogte van de hamer instelbaar is, zodat eenvoudige sterktegradaties in het automatisch spel te realiseren zijn. In de praktijk echter komt daar weinig van terecht.

10.11 Het elektromagnetisch speelwerk

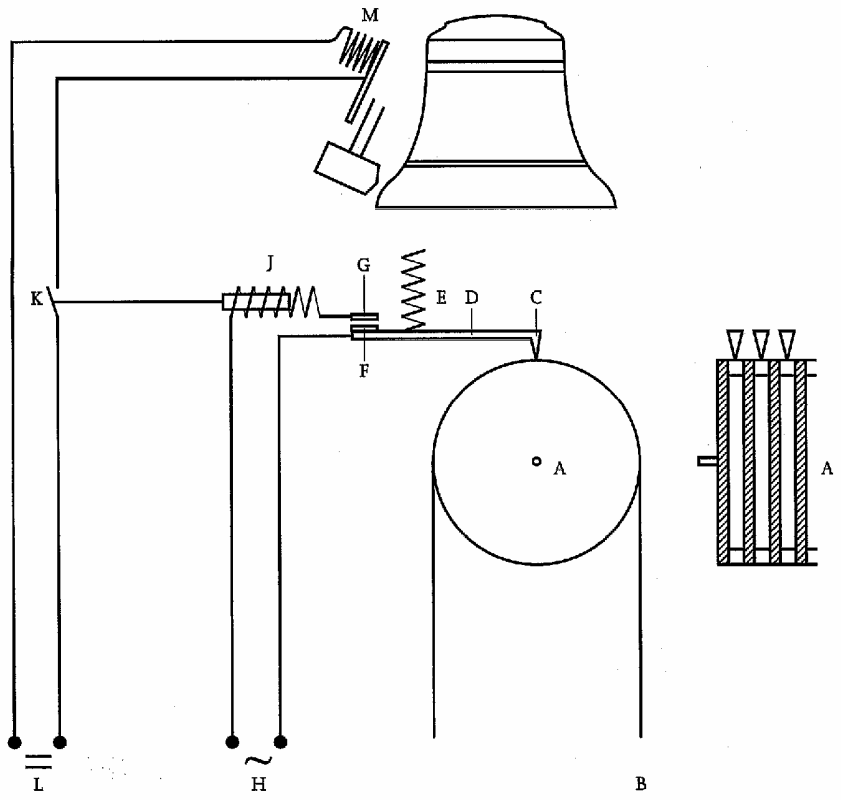


Figuur 84: De elektromagnetische speelhamer (voor- en zijaanzicht).

Hoewel het trommelspeelwerk met verstelbare noten het grote voordeel heeft dat er alle ritmische figuren op uitgevoerd kunnen worden, blijft er niettemin een aantal bezwaren bestaan. Het versteken van de trommel bijvoorbeeld is een zeer tijdrovend werk (één tot twee dagen met twee man). Het gevolg daarvan is dat een trommel hoogstens vier maal per jaar verstoken wordt. Een ander bezwaar be-

staat daaruit dat het trommelspeelwerk veel ruimte in beslag neemt, zodat het eigenlijk alleen maar in grote torens toegepast kan worden. Ook is het een bezwaar dat een extra dradennet door de toren loopt. Dit alles heeft men trachten te ondervangen in het elektromagnetische speelwerk.

In figuur 84 is de *elektromagnetische speelhamer* geschetst. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het principe dat wanneer door een spoel met weekijzeren kern gelijkstroom wordt gevoerd die spoel magnetisch wordt. Vandaar de term elektromagneet. De spoel met kern is mede met het oog op regen, vocht en stof in een holle ijzeren kubus A zorgvuldig in hars ingegoten. Op A is een lager B gemonteerd waarin lagerpen C kan draaien. Om die as kunnen onafhankelijk van elkaar bewegen het klapanker D en de gaffel E van hamer F. In het zijaanzicht is omwille van de duidelijkheid het linkerdeel van de hamergaffel weggelaten. De figuur geeft de situatie in rusttoestand. Het klapanker D staat net zo ver van de magneet A af als pen G dat toestaat. Daar G instelbaar is, kan de opening van de magneet ingesteld worden.



Figuur 85: Schema van het elektromagnetisch speelwerk.

De magneethamer wordt van de klok afgehouden door veer H die eveneens instelbaar is.

Wanneer nu een stroom door de spoel van de magneet A gevoerd wordt, zodat deze magnetisch wordt, zal anker D naar A bewegen en wel met een kracht en snelheid die afhankelijk is van de sterkte van de magneet en de doorgevoerde stroom. De onderzijde van het anker zal dan met kracht tegen J aan drukken waardoor de hamer naar de klok wordt toe bewogen. Die kracht is vanzelfsprekend altijd groter dan de veerkracht van H. Na het aanslaan is de spoel inmiddels niet magnetisch meer, zodat de veer H de hamer van de klok terugtrekt en alles weer in rustpositie kan terugkeren.

Het zal duidelijk zijn dat in dit systeem de stuitpen G en de veer H een essentiële rol spelen. Immers, G bepaalt de afstand waarover het klapanker naar de magneet wordt toebewogen en derhalve de kracht waarmee tegen J, dus de hamer wordt geslagen. Aldus is het

mogelijk om de elektromagneten van een beiaard zorgvuldig af te stellen. H op zijn beurt bepaalt de snelheid waarmee de hamer na aanslaan van de klok wordt teruggetrokken en is derhalve maatgevend voor de repetitiesnelheid. In tegenstelling met de mechanische speelhaner kan de elektromagnetische voldoende snel repeteren, zodat elke klok nog slechts één hamer nodig heeft. Als vuistregel mag men stellen dat in het middenregister en de discant een repetitie van achtste noten in tempo 120 zonder meer uitvoerbaar moet zijn. De hamer slaat dan vier maal per seconde tegen de klok. Vanzelfsprekend loopt deze snelheid in de bassen wat terug. Muzikaal ontmoet dat in het algemeen geen bezwaar.

De magneethamers dienen op de juiste tijdstippen bekrachtigd te worden. Zulks geschiedt in het eigenlijke speelwerk waarin de kunststof *muziekband* is gelegd. Men noemt dit onderdeel het *bandspeelwerk*. In deze muziekband zijn ronde dan wel rechthoekige gaten, al naar gelang het type speelwerk, geponst overeenkomstig de gekozen muziek. In figuur 85 is een en ander verduidelijkt.

Op de daartoe ingestelde tijden wordt vanuit het uurwerk een motortje aangezet dat cilinder A laat ronddraaien. Om A is de eindloze muziekband B gelegd en wel zodanig dat de band met de cilinder meedraait. Rechts in de tekening is een vooraanzicht gegeven waaruit blijkt dat in die cilinder groeven zijn gedraaid. Boven de cilinder ligt een reeks lichtertjes C, boven elke groef één, overeenkomstig het aantal hamermagneten. Maar er zijn er slechts drie getekend. Elk lichtertje kan om punt D kantelen. Zodra nu een gaatje in de band onder een lichtertje passeert, zal het uiteinde daarvan, geholpen door een veer E, in het gat vallen waardoor de achterzijde F omhoog wordt bewogen en contact maakt met G. Hierdoor kan de wisselstroombron H het relais F bekrachtigen waardoor het contact K wordt gesloten. Aldus kan gelijkstroom L de magneet M bekrachtigen zodat de hamer de klok zal aanslaan.

In het hier geschetste systeem komen mechanische contacten voor, evenals relais. Natuurlijk is het denkbaar dat andere schakelsystemen gebruikt worden, zoals lichtgevoelige weerstanden. Deze echter dragen niet bij tot betere muzikale resultaten want ze hebben uitsluitend een technische betekenis.

Ook ten aanzien van de muziekband zijn verschillende systemen denkbaar. In figuur 85 ligt een eindloze muziekband B zodanig om cilinder A dat deze met die cilinder meedraait. Maar ook is het mogelijk dat men twee rollen heeft waarbij de muziekband van de ene rol op de andere wordt overgebracht en daarbij de rij contacten passeert. Dit alles echter wijzigt niets of nauwelijks iets aan het basissysteem.

Vanuit een schakelklok wordt het bandspeelwerk gedirigeerd, dat wil zeggen, in gang gezet op in die klok ingestelde tijden. In de laatste kan het automatisch spel derhalve geprogrammeerd worden. Ook bij het elektromagnetisch speelwerk is het gebruikelijk de beiaard per kwartier te laten spelen, zij het met onderbreking van de nachtelijke uren. Overigens, ook vrijwel alle mechanische trommels hebben inmiddels een elektrische nachtuitschakeling gekregen. Wordt de band vanuit de schakelklok aangezet, het stoppen van de band geschiedt vanuit de stopnoot, een gat ná elke melodie die na het passeren van zijn lichtertje het contact verbreekt van de motor die cilinder A laat ronddraaien.

Het zal duidelijk zijn dat het elektromagnetische speelwerk talloze voordelen bezit boven de trommelspeelwerken. In de eerste plaats beslaat het aanzienlijk minder ruimte dan de oude systemen. Zo vervalt het extra dradennet voor de mechanische hamers, doch bovendien de grote speeltrommel. Aldus is het mogelijk in aanzienlijk kleinere torens automatisch

kwartierspel aan te brengen. Daarnaast zijn er talrijke muzikale voordelen. Onnodig bijvoorbeeld uitvoerig te schetsen dat alle tempo's en ritmische figuren mogelijk zijn. Bovendien is men niet meer zo strikt gebonden aan een maximale lengte voor elk kwartier zoals dat bij trommels het geval is. Voorts is het bijvoorbeeld mogelijk een zogenoemde twee uursband te maken, dat wil zeggen een muziekband waardoor pas na twee uren dezelfde melodieën terugkeren. Een ander voordeel is de snellere uitwisselbaarheid van de banden, waardoor het niet alleen mogelijk is vaker per jaar nieuwe melodieën te laten horen, doch bovendien gedurende korte perioden of zelfs dagen, bijvoorbeeld Kerstmis. De banden zelf tenslotte kunnen bewaard worden, zodat na verloop van jaren een groot repertoire beschikbaar is. Wel bestaat er natuurlijk het gevaar dat de oorspronkelijke functie van het mechanisch speelwerk verloren kan gaan, namelijk de vaste melodie die voor een langere periode bij een bepaald kwartier behoort.

Wat het steken van de banden betreft, lijkt het niet bezwaarlijk anders dan enkele algemene principes te noteren. Evenals de bandspeelwerken niet genormaliseerd zijn, is dat evenmin het geval voor de *steekapparaten* waarmee de banden door de beiaardier geponst kunnen worden. Het principe is bij elk type echter hetzelfde. In de eerste plaats is het steekapparaat klein van formaat zodat de beiaardier thuis zijn banden kan steken. De band wordt daarin met de hand doorgedraaid waarbij de afstand waarover de band wordt doorgedraaid telkenmale afgelezen kan worden. Na instelling van het gewenste metronoomgetal kan die afstand afgelezen worden in muzikale waarden, dus in hele noten, halve, kwarten enz. Aldus kan de pons, die in het steekapparaat is ingebouwd, op de juiste plaats boven de band worden gebracht. Door indrukken van een hendel wordt tenslotte het gat gestoken.

Over het elektromagnetisch speelwerk, meer in het bijzonder over de elektromagnetische speelhamer nog een laatste kanttekening. Figuur 84 maakt duidelijk dat de hamer met kracht naar de klok wordt toegedreven. Bij de speeltrommels met vallende hamers is dat anders. De hamer wordt eerst opgetild en dan losgelaten. De ervaring leert dat de klok daarmee een mildere klank krijgt. Iets dergelijks zou ook met een magneet kunnen. Want als men een constructie maakt waarin de magneet de hamer eerst optilt en dan laat vallen, heeft men een identieke situatie als bij de speeltrommel. Toch is dat principe slechts in een enkel geval toegepast. En dat is jammer.

10.12 Het computerspeelwerk

In het voorafgaande was de muziekband de informatiedrager van het elektromagnetisch speelwerk. Maar sinds het midden van de jaren tachtig van de vorige eeuw kan dat ook de computer zijn, ja in feite wordt het bandspeelwerk niet meer gemaakt en worden de nog bestaande geleidelijk aan door computers vervangen. Bij buitenstaanders leidt dat soms tot het misverstand dat dankzij de introductie van de computer de beiaardier overbodig is geworden. Maar dat is natuurlijk niet waar. De computer immers is slechts de informatiedrager van de muziek.

Het is belangrijk te beseffen dat de aanslagapparatuur nog steeds de aloude elektromagnetische speelhamers zijn. Met deze hamers een systeem te ontwikkelen om het mechanisch spel de intentie van handspel mee te geven, dus met alle nuances tussen piano en forte, is onmogelijk. Weliswaar zijn de computertechnieken daar volop voor beschikbaar, maar de

elektromagnetische hamer laat het volledig afweten en is daar ook veel te grof voor gebouwd. Sinds de introductie meer dan een halve eeuw geleden van deze speelhamer is zijn toch wel grove constructie dan ook nauwelijks gewijzigd! Intussen is er echter een meer verfijnde variant beschikbaar die wel in staat is met verschillende aanslagsterktes te nuanceren. Maar helaas, gemeengoed is die nog lang niet.

Maar keren wij terug naar het computerspeelwerk met de vraag wat daar het wezenlijke element van is. Simpelweg gezegd, de relevante gegevens van een melodie ten behoeve van de sturing der magneten kunnen op gemakkelijk wijze in het computerspeelwerk ingebracht worden en vervolgens weer opgeroepen. Welke stappen leiden echter tot het klinkende resultaat?

Zoals al vele eeuwen gebeurt, schrijft de beiaardier zijn versteek allereerst op muziekpapier uit. Daarbij is het wezenlijk voor de volgende stap of die muziek op een elektronisch klavier (keyboard) te spelen is of niet. Dat kán namelijk de manier bepalen waarop de noten en het ritme in de computer wordt ingebracht. En voor de goede orde zij opgemerkt, die computer is niet het computerspeelwerk op de toren maar een computer, voorzien van een muziekprogramma, dat de beiaardier thuis heeft staan of in de beiaardschool dan wel op een klokkengieterij.

Is de melodie nog handmatig te spelen dan kan de beiaardier zijn elektronisch klavier op een computer aansluiten en zal hij al spelende de noten en notenwaarden in te computer brengen. Het is een simpele techniek waaraan echter bezwaren kunnen kleven. In de eerste plaats zou deze methodiek een aanpak in de hand kunnen werken waarin de automatische muziek alleen nog maar muziek is die met de hand te spelen is. Maar dat behoort die muziek juist niet te zijn. Want als gevolg van het feit dat geen dynamische schakeringen aangebracht kunnen worden, dient automatische muziek een geheel eigen structuur te bezitten. Een krachtige eerste tel kan bijvoorbeeld niet met een forte gerealiseerd worden, doch wel met meer klokken tegelijk. Daarnaast is het handmatig inspelen van de muziek bezwaarlijk wanneer dat niet zeer professioneel gebeurt.

Een beter lijkende manier is om de muziek niet te spelen, doch de noten via een toetsenbord één voor één in te brengen. En dat kan zowel een muziektoetsenbord zijn als dat van de computer zelf. In beide gevallen wordt niet meer gespeeld doch worden de toetsen slechts gebruikt om informatie over te dragen. In dat geval kan de musicus zonder bezwaar een onspeelbare melodie schrijven, bijvoorbeeld met ver uit elkaar liggende stemmen of met antimetrische figuren, zoals binnen eenzelfde tijd vijf tegen negen noten te laten horen.

Is de muziek eenmaal in de computer ingebracht dan biedt de huidige elektronische apparatuur ruimschoots de mogelijkheid om de melodie terug te horen, compleet met nagebootste klokken. Bovendien kan er naar hartenlust met ritmen geëxperimenteerd worden, met transposities zodat de melodie op de juiste toonhoogte wordt gehoord enz. Daarnaast wordt het notenschrift automatisch op het scherm zichtbaar gemaakt. Met behulp van het toetsenbord of de muis kan de beiaardier daar ook nog veranderingen in aanbrengen, kan hij noten wissen en toevoegen en wat al niet meer. En dat zal hij natuurlijk doen zolang de muziek nog niet helemaal aan zijn verwachtingen beantwoordt.

Overigens leent deze techniek zich ook wel voor muziek die eerder met de hand werd ingespeeld en aldus in de computer werd opgeslagen. Door die muziek namelijk op het scherm zichtbaar te maken kan het muziekprogramma van de computer onregelmatigheden in

de ritmiek wegnemen, kan de beiaardier noten toevoegen, verwijderen enz., kortom, alsnog elementen toevoegen waartoe een handmatige aanpak ten enenmale ongeschikt voor is. In de computer is dan alle informatie verzameld voor het weergeven van de melodie met het computerspeelwerk op de toren.

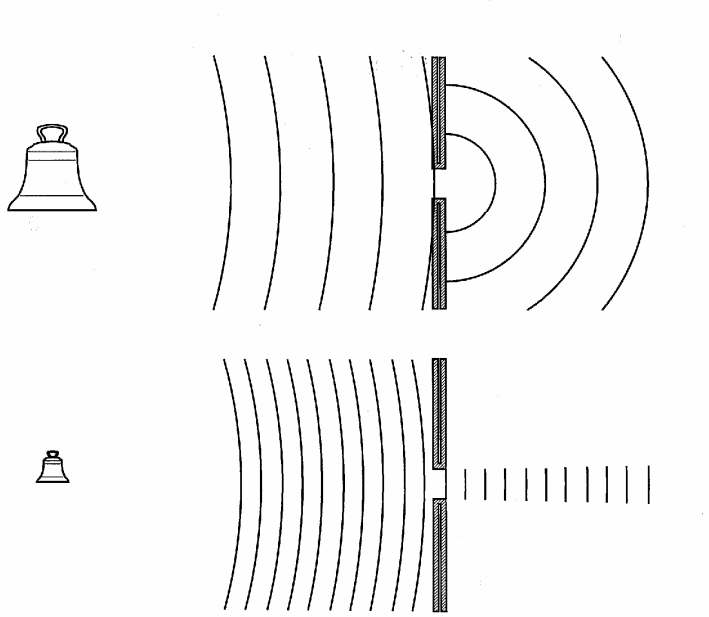
Mits de beiaardier de neiging weet te weerstaan om automatische muziek handmatig in te spelen en daarmee tot een afgeleide te maken van het handspel, lijkt er niets aan de hand. Toch is er een ander bezwaar. De computer leent zich namelijk uitstekend voor grote opslag van melodieën, tot wel honderd toe. Daarmee bestaat het gevaar dat de oorspronkelijke functie van de uurmelodie verdwijnt. Was deze namelijk bedoeld als een herkenbaar teken voor het uur, en elk uur weer, thans bestaat de mogelijkheid om elk uur een andere melodie te laten horen. Aldus is de automatisch muziek meer een verstrooiend karakter toegekend dan een functie in de tijdmarkering. Natuurlijk kan men die nieuwe benadering als legitiem aanvaarden en inderdaad accepteren dat het aloude karakter van de automatische uurmelodie aan het verdwijnen is.

Een ander gevaar bestaat uit te lange en te gecompliceerde melodieën. Was dat al aanwezig bij de muziekbanden in de bandspeelwerken, de computer staat in deze voor niets. Toch wordt noch een lange melodie noch complexe muziek voor de automaat op den duur gewaardeerd. En de reden is simpel: automatische muziek is geen officiële muziekuitvoering, doch een muzikaal baken in de tijd, niet meer en niet minder.

11 DE INVLOED VAN DE KLOKKENKAMER OP DE KLANK

11.1 Enkele theoretische grondslagen

Men hoort wel eens de mening verkondigen dat een klokkenkamer met kleine openingen waarin galmborden zijn aangebracht, de zogenoemde *gesloten klokkenkamer*, juist daarom zo aantrekkelijk is omdat de klokkenklanken zich in die ruimte eerst zouden mengen en pas dan naar buiten zullen treden. Dit is vanzelfsprekend een volstrekt onhoudbare stelling. Alsof die klokken samen afspreken hun klanken even vast te houden om gemengd te kunnen worden en pas daarna dat mengsel als een gesloten eenheid tot de luisteraar te laten komen!



Figuur 86: De passage van laag- en hoogtoning geluid door een smalle opening.

Natuurlijk kan men in dit verband aan de nagalmtijd van de klokkenkamer denken, in analogie met de concertzaal waarin de klank der instrumenten bij een correcte nagalmtijd aan diepte en glans wint. Hoe is dat echter bij een klokkenkamer?
In de eerste plaats kan men al zonder enige meting of berekening vaststellen dat een open lantaarntoren geen nagalmtijd bezit. Het geluid van de klok verlaat immers onmiddellijk de toren. Blijkbaar zijn kaatsende vlakken een eerste voorwaarde voor een reële nagalmtijd. Dit impliceert dat naarmate het galmgatenoppervlak groter wordt ten opzichte van de muren de nagalmtijd terug loopt. Immers, hoe groter de galmgaten, hoe meer geluid direct naar buiten verdwijnt en hoe minder geluid weerkaatst wordt. Maar ook het absorptievermogen van die vlakken speelt een rol. In het theoretische geval namelijk dat de wanden van de klokkenkamer al het geluid wat erop valt, zouden absorberen, zou er evenmin van een nagalmtijd sprake kunnen zijn. De nagalmtijd is derhalve afhankelijk van de akoestische eigenschappen van de wanden en de grootte van de galmgaten.

Teneinde onze gedachten te kunnen bepalen, kiezen wij een klokkenkamer van 5 x 5 x 7 meter. De muren daarvan zijn uit ruwe baksteen gemetseld. Berekeningen tonen aan dat de nagalmtijd in die kamer tussen een halve en een hele seconde ligt, althans wanneer het galmgatenoppervlak 20% of meer is van het totale muuroppervlak. Strikt genomen dient men daarbij een relatie te leggen met de frequentie van het geluid. Hoe hoger namelijk de frequentie, hoe groter het absorptievermogen van de wanden is en hoe korter de nagalmtijd zal zijn. Op dit aspect verder in te gaan heeft echter geen enkele zin. Daar namelijk de nagalmtijd van

de klokkenkamer in de orde van grootte van één seconde ligt en de uitklinktijd van een klok een veelvoud daarvan is, valt eerstgenoemde grootheid volledig weg tegen de tweede. De conclusie is dan ook dat de nagalmtijd van een klokkenkamer volstrekt onbelangrijk is.

Geen klankmening en een onbelangrijke nagalmtijd, wat is het dan wel dat de relatief gesloten klokkenkamer zijn voortreffelijke akoestische eigenschappen geeft? Is het de kaatsende werking van de muren in de klokkenkamer, zijn het de galmborden die veelal in de galmopeningen zijn aangebracht? Teneinde deze vragen te kunnen beantwoorden, zal het goed zijn enkele algemene aspecten van het geluid aan een nader onderzoek te onderwerpen,

In figuur 86 hebben wij twee situaties geschetst. In A is een relatief grote klok achter een muur met een tamelijk kleine opening geplaatst. In B gaat het om eenzelfde muur met opening, doch dan met een betrekkelijk kleine klok. Wat is het verschil in geluidsuitstraling? In beide gevallen zullen de geluidsgolven de muur met opening bereiken. Het laagtonige geluid zal zich echter, na het passeren van de opening, naar alle richtingen verstrooien. De klankbron is als het ware in die opening geplaatst. Het hoogtonige geluid daarentegen blijft zich ook na het passeren van de opening rechtlijnig voortplanten zodat slechts een smalle geluidsbundel overblijft. Het handelt derhalve alsof het licht is. Uiteraard is de grens tussen de rechtlijnige voortplanting en de verstrooiing moeilijk aan te geven. Er blijft namelijk altijd een gebied aan te wijzen waarin beide verschijnselen optreden. Globaal mag men echter stellen dat vanaf klokken met een slagtoon a^2 het lichtprincipe meer en meer gaat overheersen. Toegepast op figuur 86 betekent dit dat een discantklok die bezijden de opening, dus achter de muur hangt, buiten niet of nauwelijks gehoord wordt, terwijl het voor een basklok vrijwel geen verschil maakt hoe haar positie ten opzichte van de opening is.

Het verschijnsel van rechtlijnige voortplanting dan wel verstrooiing van het geluid speelt ook bij de weerkaatsing een rol. Wanneer namelijk laagtonig geluid op een wand valt, zal het weerkaatste geluid zich naar alle richtingen verspreiden. Hoogtonig geluid daarentegen zal als licht reageren en derhalve zoals licht weerkaatst worden. Overigens geldt dit natuurlijk des te meer naarmate het kaatsende oppervlak een gladdere structuur heeft. Een korrelig muuroppervlak zal namelijk ook hoogtonig geluid althans voor een deel verstrooien. Een glazen wand daarentegen niet.

toon	freq. (Hz)	golflengte (m)
C	65,406	5,24
c	130,813	2,62
c^1	261,626	1,31
c^2	523,251	0,66
c^3	1036,50	0,33
c^4	2093,00	0,16
c^5	4286,01	0,08

Frequentie en golflengte.

Willen wij tenslotte een verklaring van boven gesignaleerde verschijnselen geven, dan kunnen wij op de algemene regel wijzen dat wanneer de golflengte van het betrokken geluid vergelijkbaar is met de afmetingen van de objecten die dat geluid ontmoet, verstrooiing zal optreden. Zuivere weerkaatsing zal plaatsvinden wanneer de golflengte vele malen kleiner is dan genoemde afmetingen.
Zoals bekend is, wordt de golflengte berekend door de geluidssnelheid (343 meter per seconde bij 20 ^{0}C) te delen door de frequentie. Op die wijze komt men tot het in de tabel gegeven overzicht. Duidelijk blijkt dat discantklokjes korte golflengtes bezitten, waar-

den die doorgaans aanzienlijk kleiner zijn dan de afmetingen van de objecten (openingen, muren, galmborden enz.) die het geluid van de klokjes ontmoeten. Voor grote klokken geldt min of meer het tegenovergestelde. Hun geluid bezit golflengtes die wel degelijk vergelijkbaar zijn met genoemde afmetingen, zodat klankverstrooiing zal optreden. Het is natuurlijk een globale bewering. De lage partialen van deze klokken bezitten namelijk golflengtes die vergelijkbaar zijn met genoemde afmetingen waardoor klankverstrooiing van die tonen zal optreden. Voor de hogere boventonen geldt echter hetzelfde wat voor de discantklokjes van kracht is. Die tonen zullen derhalve als licht reageren. Het betekent dat een deel van de klank van een grote klok verstrooid zal worden en een ander deel zich rechtlijnig zal voortplanten. Zoals wij zullen aantonen, kan dit voor de luisteraar van verstrekkende betekenis zijn.

11.2 De echowerking van de klokkenkamer

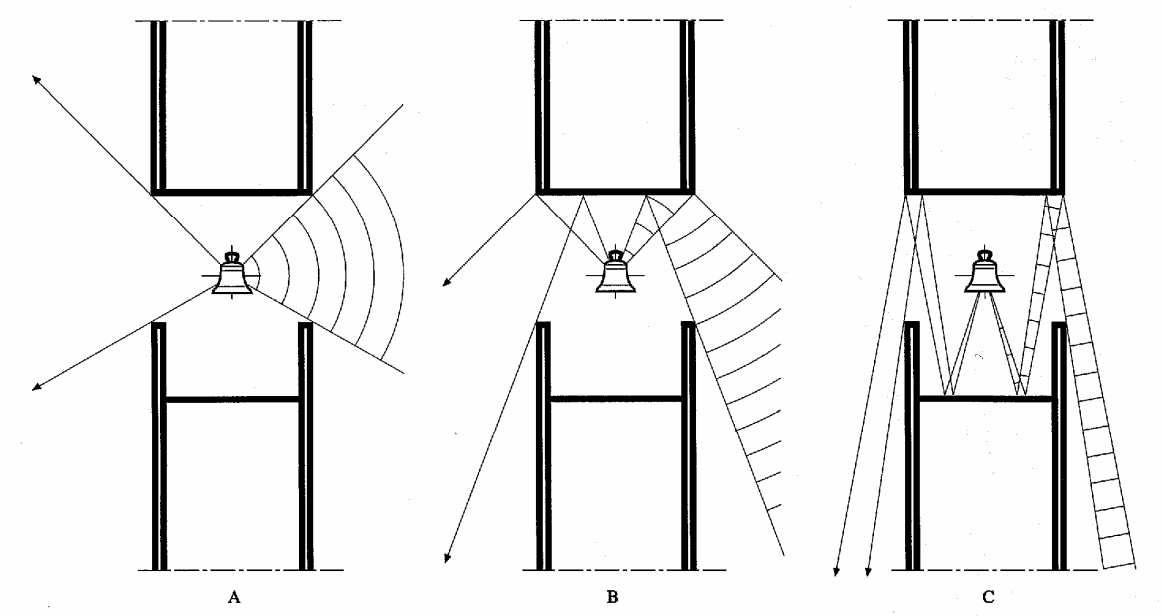
In 10.1 werd de vraag onbeantwoord gelaten waarom een zogenoemde gesloten klokkenkamer voor klokken zo aantrekkelijk is. Na de inleidende theoretische beschouwingen menen wij thans het antwoord te mogen geven: de *echowerking* van de klokkenkamer in combinatie met de afscherming door de galmborden. Wat met het eerste precies bedoeld wordt. is in figuur 87 nader verduidelijkt.

In deze figuur is een poging gedaan om aan te tonen op welke wijze het klokgeluid de luisteraar kan bereiken. In A ziet men dat in feite betrekkelijk weinig geluid rechtstreeks de toren uittreedt. Een ander deel zal eerst tegen het plafond (B) weerkaatsen dan wel tegen de vloer en daarna plafond (C). Vanzelfsprekend zijn daarmee de denkbare geluidswegen allerminst uitgeput. De figuur wil daarom slechts illustreren dat de luisteraar in het algemeen niet één enkele slag hoort, doch een slag gevolgd door een aantal echo’s. Deze echo's zal hij echter allerminst als zodanig herkennen. Daar is namelijk de tijd tussen de verschillende geluidsgolven die de toren verlaten te gering voor. Bovendien zal bij elke weerkaatsing een deel van het geluid door het kaatsende oppervlak geabsorbeerd worden.

Om de gedachten te bepalen kan men die vermindering van geluidsintensiteit per weerkaatsing op 5-10% stellen. Het betekent dus dat een luisteraar niet een felle, korte slag hoort, doch een meer aangename, brede slag die gedurende zijn overigens toch nog korte duur in sterkte afneemt. Bij dit alles moet bovendien bedacht worden dat in de praktijk de geluidsgolven nooit zo scherp begrensd zijn als in de tekening is aangegeven. In feite zou het verstrooiingseffect aan die schets toegevoegd dienen te worden. En dat dit bijzonder essentieel is, moge uit de volgende overweging blijken.

Indien het geluid werkelijk zo scherp begrensd de toren verlaat als in figuur 87 is getekend, zouden er maar weinig plaatsen rondom de toren zijn waar meerdere echo's gelijktijdig gehoord kunnen worden. Wordt het geluid daarentegen verstrooid, dan zullen meerdere geluidsbundels samenvallen. Verstrooiing is derhalve een wezenlijke voorwaarde voor een hoorbare echowerking van een klokkenkamer. Maar dit impliceert gelijktijdig dat alleen middengrote en grote klokken dit verschijnsel kunnen oproepen. Het geluid van hoge tonen, dus van kleine klokken, reageert immers als licht, zal derhalve het in figuur 87 geschetste beeld aanzienlijk nauwkeuriger volgen. De conclusie is dan ook dat voor kleine klokken een min of meer gesloten klokkenkamer zonder galmborden van weinig belang is, ja zelfs schadelijk kan zijn zoals wij nog zullen aantonen. Pas met klokken die een slagtoon hebben lager dan a^2,

wordt het echo-effect van belang. Overigens is het vanzelfsprekend mogelijk voor de hogere boventonen van de laagklinkende klokken een soortgelijke redenering te geven als voor de kleine klokken.



Figuur 87: Echo's in een klokkenkamer.

Een andere essentiële voorwaarde voor een echowerking is een voldoend aantal kaatsende oppervlakken. Een volledig open toren immers zal van dit verschijnsel niets laten horen. Waar de overgang precies ligt, is moeilijk vast te stellen. Men zou echter de regel kunnen hanteren dat wanneer het galmgatenoppervlak minder dan 40% van het muuroppervlak bedraagt, waarneembare echo's verwacht mogen worden. Natuurlijk kan men anderzijds niet ongelimiteerd de openingen verminderen. Een onderste grens is op 20% te stellen. Nog minder openingen zou de klokkenklank ontoelaatbaar afzwakken.

In het bovenstaande werd vastgesteld dat de echowerking voor kleine klokjes, dus hoge tonen, van geen belang is. Sterker nog, er zijn situaties denkbaar waarin die echo's de klank van die klokjes kunnen schaden. Een toren bijvoorbeeld zonder galmborden en veel kaatsende vlakken die bovendien nog betrekkelijk glad zijn, kan de hogere tonen ongewenst versterken en daardoor een scherp en fel karakter geven, in het bijzonder wanneer enkele echobundels samenvallen met het directe geluid. Zulks zal vooral het geval zijn bij moderne torens, uitgevoerd als die zijn in betrekkelijk glad afgewerkt beton. Aldus moet men stellen dat dit type toren allerminst geschikt is voor hoog klinkende klokjes. Hoe het hier gesignaleerde probleem opgelost kan worden. zal in 11.3 (met galmborden) en in 11.4 (met akoestische materialen) behandeld worden.

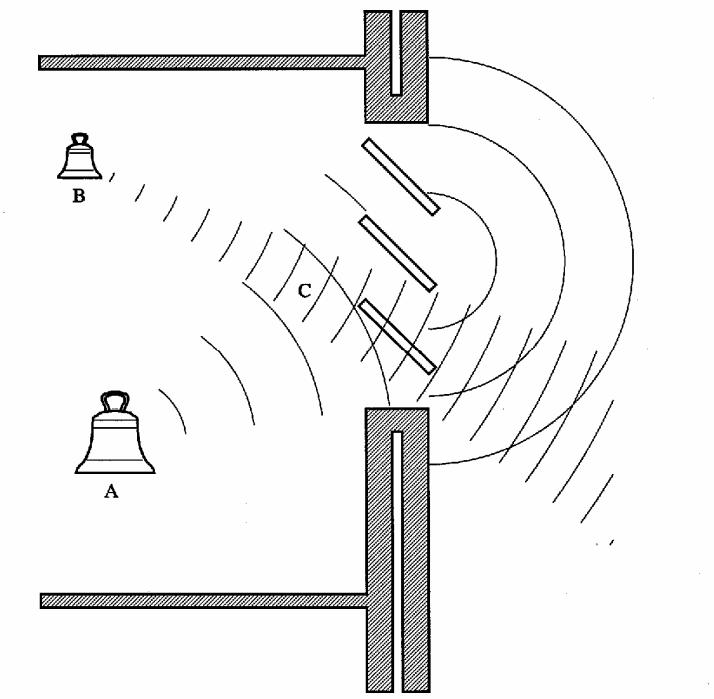
11.3 Galmborden

Hoewel galmborden in de eerste plaats bedoeld zijn om regen en sneeuw uit de toren te weren, hebben zij tevens een gunstige invloed op de klokkenklank. Ook hier speelt het verstrooiingseffect weer een belangrijke rol.

Stel wij hangen in de klokkenkamer waarvan in figuur 88 een gedeeltelijke doorsnede is gegeven, in A een zware klok. De geluidsgolven zullen zich in aangegeven zin verplaatsen. Bij de galmborden gekomen, zal de klank zich als het ware hergroeperen en zoals getekend aan de luisteraar manifesteren.

Hierbij dient men echter te bedenken dat deze redenering alleen voor lagere tonen in die klok van kracht kan zijn. Hogere tonen immers hebben golflengtes die in grootte belangrijk kleiner zijn dan de afmetingen van de galmborden en de openingen daartussen. Voor de hogere boventonen zal derhalve aanzienlijk minder, zo niet geen enkele verstrooiing optreden. Hun geluid kaatst tegen de wanden en de galmborden en zal daarom, zoals gemakkelijk is na te gaan, moeilijk tot zeer moeilijk uit de toren komen. De consequentie daarvan is dat de luisteraar beneden een klok met enigszins afgezwakte boventonen hoort. Natuurlijk kan die verzwakking slechts weinig zijn en als zodanig misschien niet eens herkenbaar. Wel echter zal de luisteraar constateren dat de bewuste klok een mildere klank heeft gekregen dan in een toren zonder galmborden of in een volledig open toren.

Herinneren wij ons de gunstige werking van de echo's in een enigszins gesloten klokkenkamer, de galmborden versterken die milderende werking zodat niet voor niets dit type klokkenkamer hoog genoteerd staat. Natuurlijk zijn er, zoals met zovele andere zaken, musici te vinden die het daar niet mee eens zijn. Zij redeneren dat een dergelijke toren aan basklokken te weinig geprononceerdheid geeft, zodat in drukke passages een te grote hoeveelheid laag getimbreerd geluid gehoord wordt, klanken die bovendien in toon dikwijls moeilijk herkenbaar zijn. Het lijkt een wat overtrokken conclusie.



Figuur 88: Het effect van galmborden.

Hoe is echter de situatie voor de kleine klokjes? Op het eerste gezicht lijkt die ongunstig. Immers, galmborden hebben doorgaans aanzienlijk grotere afmetingen dan de golflengtes van het geluid van die klokjes, zodat hun klank als het ware opgesloten lijkt in de toren. Ervaringen uit de praktijk logenstraffen echter zo'n extreem gestelde bewering. Juister is dan ook om vast te stellen, dat de plaats waar de discantklokjes van een beiaard gehangen worden, met zorg gekozen dient te worden. Vanzelfsprekend speelt daarbij het karakter van de kaatsende vlakken in de torenkamer een belangwekkende rol. Bij harde, gladde en daardoor sterk weerkaatsende betonwanden zou men bijvoorbeeld bewust wat meer afscherming door de galmborden mogen verlangen dan in het geval de wanden uit de heel wat mildere bakstenen bestaat. Hoe is echter de situatie in het algemeen?

Wanneer een klein klokje op plaats A in de klokkenkamer van figuur 88 wordt gehangen, dient men te verwachten dat de galmborden een belemmering vormen voor het uittreden van het geluid. Van dat klokje zal men derhalve beneden weinig kunnen horen. Hoog in de klokkenkamer, bijvoorbeeld in punt B, zou daarom aanzienlijk beter zijn. De conclusie is dan ook dat de min of meer gesloten klokkenkamer met galmborden voor kleine klokjes geen gevaar inhoudt mits die klokjes voldoende hoog in de toren worden opgehangen. Dit is overigens in tegenspraak met eerder ontwikkelde gedachte met de betrekking tot de bouw van een beiaard (10.7). Daar immers stelden wij dat die klokjes zo dicht mogelijk bij het klavier moeten hangen teneinde de klavierdraden zo kort mogelijk te houden. Een oplossing bestaat eruit het klavier zodanig te plaatsen dat de zware klokken onder dat klavier hangen en de lichte erboven.

De discantklokjes hoog in de toren is een duidelijke eis. Maar mogen ze ook uit het centrum worden gehangen bijvoorbeeld in C? De ervaring leert dat dit volstrekt uit den boze is. Hangt een klein klokje namelijk direct achter een galmbord, dan zal hij aan die zijde slechts op enkele plaatsen te horen zijn, terwijl aan de tegenoverliggende kant van de toren de hoorbaarheid veel beter is. Kennelijk loopt het geluid onmiddellijk dood op de nabij gelegen galmborden, terwijl aan de andere zijde ook het weerkaatste geluid tot een betere hoorbaarheid aan de voet van de toren kan bijdragen.

De plaats van de kleine klokjes kan derhalve in een toren van het hier besproken type niet naar willekeur gekozen worden. Hoog in het een centrum is derhalve de beste plaats. Naarmate de klok groter wordt, kan men soepeler zijn, hoewel een vuistregel luidt dat de onderrand van een zware klok niet lager mag komen dan de onderkant van het galmgat.

Tot nog toe is steeds over het effect van de galmborden gesproken zonder een duidelijke uitspraak te doen over hun afmetingen en onderlinge positie. Wat dit laatste betreft hanteert men in het algemeen de regel dat men nog net in horizontale richting tussen twee borden moet kunnen doorkijken. Elkaar overlappende galmborden zijn derhalve onder alle omstandigheden te vermijden. Over de breedte (diepte) van de borden valt moeilijker een uitspraak te doen, hoewel twee meter wel als een maximum gezien moet worden. Verkleining teneinde ook het geluid van de kleine klokjes te kunnen verstrooien, is natuurlijk altijd wenselijk. Anderzijds speelt dit vanzelfsprekend in torens waar uitsluitend luidklokken hangen geen enkele rol. De helling tenslotte van de galmborden mag zonder bezwaar op 45^0 gesteld worden. Vlakker liggende galmborden zullen de hoorbaarheid op grote afstand bevorderen, terwijl steilere het geluid zullen afzwakken, in het bijzonder weer van de hoge tonen.

11.4 De open klokkenkamer

In 11.2 en 11.3 werden de beschouwingen toegespitst op een klokkenkamer waarvan de galmgaten met galmborden zijn afgedicht. Het zal duidelijk zijn dat deze gesloten klokkenkamers in de eerste plaats geschikt zijn voor omvangrijke en vooral zware beiaarden en dito luidklokken, een voorkeur die ook al in de hand wordt gewerkt omdat deze klokkenkamers doorgaans ruim tot zeer ruim van afmetingen zijn.

In 11.2 werd echter ook het probleem van een open klokkenkamer met veel kaatsende vlakken genoemd. Bovendien gaat het dan meestal om moderne bouwsels waarin de traditionele galmborden zijn weggelaten. Juist in die torens wordt het richteffect van hoogklinkende klokjes sterk bevorderd. Bovendien constateert men heel dikwijls dat rondom zo'n toren de beiaard niet op alle plaatsen gelijk getimbreerd is. Aldus kan het wel eens gebeuren dat op enkele plaatsen in de omgeving van de toren het klokgeluid hard en fel is geworden. Kennelijk staat men dan zodanig dat een groot kaatsend oppervlak in het verlengde ligt van de lijn luisteraar - galmopening. Zoals reeds eerder werd aangetoond is de traditionele oplossing van dit probleem het galmbord. Er zijn echter ook andere mogelijkheden.

Men kan namelijk de storende kaatsende wanden met een geschikt akoestisch materiaal bekleden. Dit materiaal zou dan een hoog absorptiecoëfficiënt moeten bezitten voor hoge tonen en een laag voor lage tonen. Op die wijze worden de fel geworden boventonen van lage klokken en de klank van hoge klokjes enigszins afgeremd. Een milder karakter is het resultaat. Helaas echter wordt deze oplossing maar al te weinig toegepast. Ook zou men kunnen denken aan panelen met *diffusors* die het geluid verstrooien en dus voorkomen dat hoogtonig geluid als licht weerkaatst wordt. Het is overigens ook om die reden dat in moderne concertzalen vrijwel altijd diffusors worden aangetroffen.

Het boven gesignaleerde verschijnsel van ongelijkmatige geluidsuitstraling kan nog erger worden wanneer de galmgaten smal en hoog worden gemaakt. Het betekent immers dat de laag klinkende klokken met lange golflengtes meer dan gebruikelijk worden afgeremd, terwijl de kleine klokjes nog meer dan in andere situaties uitsluitend op enkele plaatsen te horen zijn. Door het verzwakken van de lage tonen wordt dus het richteffect van de hoge tonen nog eens extra onderstreept. Een juist geproportioneerd galmgat is dan ook stellig aan te bevelen.

De hier besproken toren kan dikwijls nog van imposante afmetingen zijn, zodat het aanbrengen van een zware beiaard of luidklokken allerminst misplaatst is, hoezeer men ook aan de akoestische consequenties aandacht moet schenken. Anderzijds zal het duidelijk zijn dat naarmate het galmgatenoppervlak vergroot wordt en dus geleidelijk aan de lantaarntoren bereikt wordt, van al genoemde euvelen slechts weinig overblijft. Lantaarntorens zijn echter doorgaans laag gebouwd zodat een zware beiaard daarin meestal niet op zijn plaats is.

Het bovenstaande is belangrijk in het licht van de geluidshinder die heden ten dage in het centrum van de belangstelling staat. Want ook de beiaard blijkt bij tijd en wijle aan de Wet Milieubeheer (voorheen Hinderwet) getoetst te worden! Daarbij zij het overigens opgemerkt dat het niet zozeer gaat over het momentane geluidsniveau, doch veel meer over een bepaald gemiddelde gedurende een zekere tijdsduur en uitgedrukt in het equivalent geluidsniveau. Voor meer informatie hierover zij naar de vakliteratuur verwezen.

12 LITERATUUR

Van de auteur verschenen in de loop der jaren onder meer de volgende relevante boeken en tijdschriftartikelen:

12.1 Over de geschiedenis van klok en beiaard:

- Middeleeuwse klokkengietkunst. In: Klokken en Klokkengieters (Culemborg, 1963), blz.13-158.
- De klokkengieters François en Pieter Hemony (Asten, 1959).
- Van paardebel tot speelklok. De geschiedenis van de klokgietkunst in de Lage Landen (Zaltbommel, 1971, 2de druk 1981).
- Het middeleeuwse klokkenspel van Bethlehem. In: Klok en Klepel, speciale editie, no.27, december 1981.
- Klokken en klokkenspelen in het Oude China tijdens de Shang- en Chou-dynastie (Asten, 1985).
- [samen met W.Truyen en G.Huybens] Beiaardkunst in de Lage Landen (Tielt, 1991).
- De klokkengieters Petit te Helmond, Someren, Eindhoven, Aarle-Rixtel en Gescher (D.) gedurende de achttiende eeuw en het begin van de negentiende eeuw (Asten, 2002).
- Een klokkengieter schrijft zijn opdrachtgever. De brieven van klokkengieter Pieter Hemony (Amsterdam) aan abt Antoine de Loose (Ename, B.) 1658-1678 (Asten, 2004).

12.2 Over vormen en gieten van klokken

- Enkele aspecten van het klokkengieten. In: Metalen , jg.16, 1961, blz.128-132, 152-156 en 168-171.
- Het vormen en gieten van een klok. Herschreven naar een verhandeling uit 1795 van A.H. van Bergen. In: Klok en Klepel , no.43, december 1989, blz.19-29; Deense vertaling in: Acta Campanologica , vol.4, 1991, blz.267-279.
- Het vormen en gieten van klokken in het verleden (Asten, 2000).

12.3 Over de campanologie:

- Een klankanalyse van de 16de-eeuwse Van Wou-klokken in de Domtoren te Utrecht (Asten, 1980).
- Partial Groups in the Bell Sound. In: The Journal of the Acoustical Society of America , vol.79, 1986, blz.2000-2011.
- The designing of swinging bells and carillon bells in the past and present (Asten, 1987).
- The tuning of the Bells of Marquis Yi. In: Acustica , vol.67, 1988, blz.144-148.
- A statistical investigation of historical swinging bells in West Europe. In: Acustica , vol.74, 1991, blz.97-108.
- Profielconstructies van luid- en beiaardklokken in het verleden (Asten, 1991).
- Acoustic research. In: 45 Years of Dutch Carillons 1945-1990 , L.Boogert, A.Lehr, J.Maassen (ed.), 1992, blz.132-145.
- Vormoptimalisatie van luid- en beiaardklokken. In: Symposium Structural Optimization in the Netherlands , F. van Keulen en A.J.G. Schoofs (ed.), November 9, 1995, Technische Universiteit Delft.

- Berekening van het klokprofiel. De eindige-elementen-methode in combinatie met optimalisatie-techniek helpt een oud ambacht. In: Principieel, werktuigbouwkundig magazine, Universiteit Twente , jg.1, Lente 1997, blz.23-28.
- Designing Chimes and Carillons in History. In: Acustica, 1997, vol.83, blz.320-336.
- Metaalkunde en Torenklokken. In: Metalen in Monumenten en Vernieuwbouw , Syllabus van de Studiedag van WTA, Nederland-Vlaanderen, Wetenschappelijk-Technische Groep voor Aanbevelingen inzake Bouwrenovatie en Monumentenzorg, op 21 november 1997 in het Provinciehuis te Antwerpen, blz.60-73.
- Campanologie. Een leerboek over klank en toon van klokken en beiaarden (Mechelen, 1997, 2de druk 1998).
- The Geometrical Limits of the Carillon Bell. In: Acustica, vol.86, 2000, blz.543-549.
- The Removal of Warbles or Beats in the Sound of a Bell. In: Acustica , vol.86, 2000, blz.550-556.
- Geschiedenis van de campanologie (Asten, 2001).

12.4 Over de tractuur van luidklok en beiaard:

- "Met losgemaakte ringkraag en in hevig zweet". Een oriënterende verkenning in oude beiaardtracturen. In: Jaarboek van het Vlaams Centrum voor Oude Muziek , jg.1, 1985, blz.109-222.
- Trommelspeelwerken in het verleden (Asten, 1993).
- Enkele wiskundige achtergronden van het broeksysteem (Asten, 2003).

12.5 Over restaureren:

- Historische en muzikale aspekten van Hemony-beiaarden (Asten, 1960).
- Restaureren - het verleden tot heden maken. In: Ergens beginnen de klokken hun lied. Zeven opstellen over de historie en de restauratie van de Utrechtse Domtoren, zijn carillon en zijn luidklokken (Utrecht, 1981), blz.63-91.
- Restoration of historic carillons. In: 45 Years of Dutch Carillons 1945-1990 , ed. L.Boogert, A.Lehr, J.Maassen (ed.), 1992, blz.74-89.
- Historische uitvoeringspraktijk op een beiaard: een illusie? In: Klok & Klepel, no.88, september 2004, blz.23-25.

13 WOORDENLIJST

Zie ook het register.

- **afschuimen**

Het verwijderen van de *slakken* die op het vloeibare brons drijven.

- **akoestische demping** zie *uitwendige demping*.
- **afsteken**

Het wegstoten van de lemen of ijzeren prop in de ovenmond zodat het brons uit de *vlamoven* of *schachtoven* kan lopen.

- **automatisch spel**

De bespeling van de beiaard wordt geregeld vanuit een automaat (*speeltrommel, bandspeelwerk* of *computer-speelwerk*) waarbij mechanische of elektromagnetische *speelhamers* de klokken aanslaan. Doorgaans wordt elk kwartier een korte melodie gegeven waarvan die op het heeluur en halfuur langer zijn dan die op de kwartieren. Verschillende speeltrommels kennen bovendien de klik, enkele noten vijf minuten voor het heel- en halfuur. De moderne speelwerken kunnen naar believen uitsluitend het vol uur geven, alleen maar het heel- en halfuur enz. Ook kennen deze een nachtuitschakeling.

- **bandspeelwerk**

Een apparaat waarin ten behoeve van het *automatisch spel* de *speelbanden* worden afgedraaid.

- **beiaard**

Een reeks klokken van tenminste 1½ octaaf waarop met de hand dan wel automatisch muziek kan worden gemaakt. Ook wel genoemd carillon of klokkenspel. Een kleinere reeks heet *voorslag*.

- **beiaardier**

Een musicus die de *beiaard* bespeelt en de automaat regelmatig van nieuwe melodieën voorziet.

- **beiaardklok**

Klok uit een *beiaard*.

- **beiaardklavier**

Klavier van waaruit de *beiaardier* de klokken van de *beiaard* bespeelt. Dit klavier heeft dezelfde indeling als een klavier van een orgel of piano. De toetsen zijn echter ronde houten stokken die met licht gebalde vuist omlaag worden geslagen waardoor via een mechanische verbinding (*tuimelaar*- of *broeksysteem*) de klepel naar de klok wordt gedreven. De chromatische toetsen liggen iets hoger en zijn iets korter dan de diatonische.

- **beieren**

Ritmisch klankspel op een aantal stilhangende *luidklokken* waarbij de *klepel*s waaraan touwen zijn bevestigd door de beierman bediend worden. Soms wordt er een zeer primitief klavier bij gebruikt.

- **bijenkorfmodel**

Een klokmodel dat sterke gelijkenis bezit met een bijenkorf.

- **bel**

Doorgaans een kleine, dunne klok met geen of zeer weinig versiering. Gewoonlijk is een bel uit messing gegoten en bovendien gepolijst.

- **bim-bam effect**

Het feit dat een luidklok met de mond naar de luisteraar een hoger klinkende klankkleur (bim) bezit dan wanneer de luidklok van de luisteraar is afgewend (bam). Ook wel ding-dong genaamd. Het verschijnsel wordt het mondingeffect genoemd.

- **binnenmal** zie *sjablone*.
- **bladveer** zie *hamerveer*.
- **boventoon**

Vrijwel elke muzikale klank bestaat uit meerdere tonen, te weten de *grondtoon* en een reeks boventonen. Tezamen worden deze de partiaaltonen of partialen genoemd. Bij de meeste muzikale klanken, zoals die van snaar of orgelpijp, is de toonhoogte identiek aan die van de grondtoon. Maar bij een klok is dat anders (zie *slagtoon*).

- **brats**

Een kuiltje met scherpe hoeken in het klokoppervlak waarin soms een schilfer klokkenbrons boven dat oppervlak uitkomt.

- **broeksysteem**

Een bepaald type draadverbinding tussen toets en *klepel*. In principe bestaat deze uit een min of meer horizontaal lopende draad die van de klepel naar een *vast punt* van de toren loopt. De richting van de draad wordt zodanig

gekozen, dat recht boven de bijbehorende toets een verticale draad aan de horizontale draad kan worden vast gemaakt. Het andere einde van die verticale draad wordt met de toets verbonden. Zodra de toets omlaag wordt gedrukt, zal de klepel naar de klok bewegen.

- **buigtrilling**

Een trilling waarbij het vlak midden door de wanddikte noch rekt noch krimpt, bijvoorbeeld bij een staaf waarvan, indien aangeslagen in het midden en derhalve een transversale trilling uitvoert, beurtelings de bovenkant krimpt en de onderkant rekt v.v. Halverwege ligt het middenvlak waarop tijdens het trillen de afstand tussen twee willekeurige punten ongewijzigd blijft. Het tegenovergestelde van een buigtrilling is een *rektrilling*.

- **buik**

Plaats op het klokopppervlak waar de wand voor een bepaalde *partiaal* het sterkst trilt. Een plaats van rust heet *knoop*.

- **buisklok**

Een buis als imitatie van een klok, in het bijzonder in een orkest.

- **buitenmal** zie *sjablone*.
- **campanologie**

De wetenschap van *klok* en *beiaard*, meer in het bijzonder van de technische, natuurkundige en muzikale eigenschapen.

- **canie**

Een in oorsprong Franse term voor *klepeloog*. Het woord wordt uitsluitend bij Petit & Fritsen gebezigd.

- **carillon** zie *beiaard*.
- **cent**

Een micro-interval dat gedefinieerd wordt als het 1200ste deel van één octaaf. Een hedendaagse halve toon bevat derhalve honderd cents.

- **change ringing** zie *wisselluiden.*
- **cire perdue** zie verloren was-methode.
- **coating** zie *deklaag*.
- **combinatienootje**

Twee, in een enkel geval zelfs drie, nootjes volgens het *vaste* type die op dezelfde brug bevestigd zijn en aldus een eenheid vormen voor bijvoorbeeld twee kwartnoten achter elkaar.

- **compensatieveer**

Een veer in de klepel-toets verbinding zodanig aangebracht dat de beiaardier tijdens het spelen minder kracht behoeft uit de oefenen. Het mechanisme wordt vooral bij zware klokken gebruikt.

- **computer-speelwerk**

Een computer waarin de informatie over de automatisch af te spelen melodieën is opgeslagen en wel zodanig dat elke *elektromagnetische speelhamer* op de juiste tijdstippen bekrachtigd wordt.

- **conische vang**

Wanneer de omlaag gedrukte toets weer naar boven gaat, hoort men bijgeluiden. Door het aanrakingsvlak schuin te maken worden die geluiden verminderd. Door technische bezwaren is het systeem nooit een succes geworden.

- **contragewicht**

Een gewicht doorgaans bovenop een *krukluidas* met het oogmerk de verdeling van de massa beter uit te balanceren en aldus het *luidtempo* te vertragen.

- **corrosieve aantasting**

Het overmatig corroderen van het klokkenbrons waardoor zowel de stemming als de klankkleur wordt aangetast. Zie ook *patina*.

- **deeltoon** zie partiaal.
- **deklaag**

Een vuurvaste laag die in vloeibare vorm met een kwast op de wanden van een gietvorm wordt aangebracht en vervolgens al of niet met behulp van extra warmte gedroogd wordt. Zie ook *zwarten*.

- **desoxyderen**

Een handeling, bijvoorbeeld het *polen* of fosforkoper (60% koper, 40% fosfor) in het gesmolten brons brengen, teneinde het koper vrij te maken van oxiden.

- **diachromatische beiaard**

Een beiaard waarin met het oog op de niet getempereerde stemming alle chromatische tonen verdubbeld zijn, bijvoorbeeld zowel een cis als een des enz. Er bestaat slechts één beiaard van dit type (Nieuwpoort B.).

- **diameter**

Deze wordt aan de *lip* van de klok gemeten en is derhalve de grootste doorsnede die de klok bezit.

- **diepgang**

De afstand waarover een manuaal of een pedaal in het *beiaardklavier* omlaag gedrukt kan worden.

- **ding-dong** zie *bim-bam*.
- **direct verbindingssysteem**

Een systeem waarbij een flexibele draad de verbinding tussen toets en *klepel* vormt. Verandering van draadrichting wordt verkregen door de draad over een draaibaar wieltje te leiden.

- **discantklokje**

Klokje uit het hoogste octaaf van een *beiaard*.

- **domperrek**

De draden van klepels en hamers worden via de vloer van de *klokkenkamer* of het *klokkenplat* naar een lager gelegen verdieping geleid en wel zodanig dat niet tevens water naar beneden sijpelt. Daarom wordt boven elk doorvoergat een kokertje in de draad aangebracht dat als een paraplu de regen tegenhoudt.

- ***Doppler effect***

Het verschijnsel dat de toonhoogte van een geluidsbron stijgt wanneer deze zich naar ons toe beweegt, en verlaagt wanneer deze zich van ons af beweegt. Voor een luidende klok is het van ondergeschikte betekenis. Belangrijker is het *bim-bam* effect.

- **draadgeleider** zie *geleidelat*.
- **draadregelaar**

Een speciaal geconstrueerde spanwartel in de draad tussen *klepel* en *beiaardklavier* of tussen *hamer* en *speeltrommel* teneinde de juiste draadlengte te kunnen instellen en daarmee een optimale aanslag.

- **drietje** zie *vast nootje*.
- **dubbelslag**

Men spreekt van dubbelslag wanneer tijdens het luiden twee aanslagen zeer kort na elkaar gehoord worden. Het is het gevolg van een niet goed geconstrueerd luidsysteem.

- **dubbeloctaaf** zie *octaafklok*.
- **duodeciem** zie *octaafklok*.
- **easy-systeem** zie *tuimelklepel*.
- **eentje** zie *vast nootje*.
- **eigenfunctie** zie *trillingsvorm*.
- **elektrisch pianoklavier**

Een pianoklavier waarin onder de toetsen elektrische contacten zijn aangebracht zodat bij indrukken van een toets de overeenkomende *elektromagnetische speelhamer* bekrachtigd wordt.

- **elektromagnetische speelhamer**

Een systeem voor vooral *automatisch spel* waarbij door het bekrachtigen van een elektromagneet de daarmee verbonden speelhamer naar de klok gedreven wordt. Zie ook *bandspeelwerk* en *computerspeelwerk*.

- **excitator**

Een klein cilindervormig instrumentje waaruit een pennetje steekt. Aangesloten op een *toongenerator* kan men het pennetje in elke gewenste frequentie laten trillen. Geplaatst op een klok zal deze in een partiaal gaan resoneren zodra de frequentie van de partiaal overeenkomt met die van het pennetje.

- ***faussure***

Een Frans woord voor het buigpunt tussen *slagring* en *flank*. Er bestaat geen Nederlands equivalent.

- **fD-waarde**

het product van de frequentie van de grondtoon en de grootste doorsnede in meters. Voor grote klokken ligt die waarde in de orde van grootte van 200 m/s. Voor een *discantklokje* uit een beiaard kan dit oplopen tot boven 600 m/s.

- **flank**

Het min of meer cilindrische deel van de klok.

- **flux**

In de gieterij een middel om de vloeibaarheid van gesmolten brons of een andere legering te verhogen.

- **frequentie**

Het aantal trillingen per seconde uitgedrukt in Hertz afgekort tot Hz.

- **galmbord**

Schuin geplaatste houten planken die voorkomen dat regen en sneeuw in de *klokkenkamer* komen. Men spreekt van een *gesloten* klokkenkamer. Galmborden hebben tevens een milderend effect op de klokkenklank

- **galmgat**

De opening in de *klokkenkamer* waardoor het geluid naar buiten kan treden.

- **geleidelat**

Teneinde het slingeren van vooral verticaal lopende draden tegen te gaan wordt op regelmatige afstanden de draad door een oog geleid.

- **gelui**

Twee of meer *luidklokken* die samen luiden. Men spreekt van tweegelui, driegelui enz.

- **gerichte tuimelaar**

Een losse tuimelaar die recht boven de overeenkomende toets wordt geplaatst en wel zodanig dat deze scharniert in het vlak waarin de klepel zich beweegt.

- **gesloten klokkenkamer**

Een klokkenkamer die met *galmbord*en is afgesloten.

- **gietgal**

Een lucht- of gasbel opgesloten in het brons. De gietgal heeft doorgaans een ronde vorm.

- **giethuid**

Het onjuiste idee dat het brons van nature bedekt zou zijn met een dun laagje bestaande uit een stof met een andere structuur dan het klokkenbrons zelf.

- **gietkammetje**

Een dun kammetje *klokkenbrons* op het oppervlak van de klok dat tijdens het gieten ontstaat door een scheurtje in de *mantel*.

- **gietpan**

Een stalen pan, aan de binnenzijde met leem bekleed, waarin het vloeibare brons uit de *smeltoven* wordt opgevangen om deze vervolgens met een kraan naar de gietvorm te brengen en aldaar door kantelen uit de gieten.

- **giettemperatuur**

De gunstigste temperatuur waarbij gegoten kan worden. Deze is altijd hoger dan de *smelttemperatuur*.

- **gotisch klokmodel**

Klokmodel dat op het einde van de middeleeuwen in West-Europa gemeengoed werd en nog altijd het meest gangbare is. Zie ook *bijenkorfmodel* en *suikerbroodmodel*.

- **groepenindeling**

Het feit dat *partialen* in groepen ingedeeld kunnen worden op basis van het aantal *knoopcirkels*.

- **grondtoon**

De laagste *partiaal* van een klank. Zie ook *boventoon*.

- **grote deciem**

Een partiaal die gewoonlijk op een interval van een octaaf plus een grote terts ten opzichte van het *slagtoon* ligt. Zie *octaafklok*.

- **grote kwartdeciem**

Een partiaal die doorgaans op een interval van een octaaf plus een grote septiem ten opzichte van de *slagtoon* ligt. Zie *octaafklok*.

- **grote terts-klok**

Een klok waarin de kleine terts-partiaal vervangen is door een grote terts.

- **grote tredeciem**

Een partiaal die doorgaans op een interval van een octaaf plus een grote sext ten opzichte van de *slagtoon* ligt. Zie *octaafklok*.

- **hamerveer**

Een lange bladveer die ervoor zorgt dat de vallende speelhamer niet op de klok blijft rusten.

- **handbel**

Een met de hand te bedienen bel, meer in het bijzonder een bel die bij het *wisselluiden* gebruikt kan worden.

- **handspel**

De bespeling van de *beiaard* door de *beiaardier* vanuit zijn *beiaardklavier*.

- **harmonisch gelui**

Twee of meer klokken die een harmonische samenklank vormen, bijvoorbeeld c - e - g. Er bestaan ook *melodische* geluien.

- **harmonischen**

Boventonen waarvan de frequenties zich tot de grondtoon verhouden als 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8 enz. of in tonen $c^1 – c^2 – g^2 – c^4 – e^4 – g^3 – bes^3$« $– c^4$ enz. Een klok heeft derhalve geen harmonische reeks boventonen.

- **hemisferische klok**

Klok in de vorm van een halve bol.

- ***Hertz*** *zie* frequentie.

- **Hollands pedaal**

Pedaal waarvan het draaipunt onder zitbank van de speler ligt. Het systeem wordt nog slechts bij restauraties toegepast.

- **inkorten**

De klok aan de rand afdraaien, dus in hoogte verminderen, waardoor de meeste partialen in frequentie zullen stijgen.

- **inwendige demping**

De omzetting van trillingsenergie in warmte.

- **inwendige stemming**

De mate waarin de partiaal ten opzichte van elkaar zuiver klinken. Zie ook *uitwendige stemming.*

- **kern**

De vuurvaste contramal van de binnenkant van de te gieten klok.

- **kernsteun**

Een lemen of metalen blokje dat tussen mantel en kern wordt geplaatst teneinde beide vormdelen ten opzichte van elkaar te fixeren.

- **klankanalyse**

Het resultaat van een meting van de partialen in een klok.

- **klankspectrum**

Een driedimensionale tekening waarin voor elke *boventoon* is aangegeven hoe de sterkte in de tijd afneemt.

- **kleine terts** zie *octaafklok*.
- **klepel**

Een peervormig dikwijls gesmeed voorwerp dan wel een aan een ijzeren staaf gegoten bol uit ijzer of mangaanmessing die in de klok hangt en waarmee deze wordt aangeslagen. Het klepelgewicht bedraagt 3-4% van het klokgewicht. Zie ook *luidklepel*.

- **klepeloog**

Een gewoonlijk ijzeren oog, dat vast in het plafond van de klok is gegoten dan wel daarin op andere wijze is vastgemaakt. Aan dat oog wordt de klepel gehangen.

- **kleppen**

Een luidklok zodanig schommelen dat de klok slechts aan een kant geraakt wordt, bijvoorbeeld voor het kleppen van het Angelus.

- **klik** zie *automatisch spel*.
- **klok**

Een klok is een rond, schaalvormig omwentelingslichaam dat volgens een bepaald *profiel* uit *klokkenbrons* wordt gegoten en bedoeld is om een muzikale klank voort te brengen.

- **klokkenbalk**

Een houten of stalen balk waaraan klokken hangen.

- **klokkenbrons**

Ook wel klokspijs genoemd. Klokkenbrons bestaat uit 18-24% tin, maximaal 4% verontreinigingen zoals lood, zink, ijzer enz. De rest is koper. Een goed klokkenbrons is bijvoorbeeld 20% tin, 78% koper en 2% verontreinigingen.

- **klokkenist** zie *beiaardier*.
- **klokkenkamer**

De ruimte in een uit stenen opgebouwde toren waar de klokken hangen.

- **klokkenluider**

Iemand die een klok luidt.

- **klokkenplat**

De vloer van een open klokkenkamer.

- **klokkenspel** zie *beiaard*.
- **klokkenstemmen** zie *stemmen*.
- **klokkenstoel**

Een houten of stalen constructie waarin de klokken hangen.

- **klokplaat**

Een rechthoekige stalen plaat die in een orkest de klok moet vervangen. Dikwijls wordt een aantal boventonen op harmonische verhoudingen ten opzichte van de grondtoon gebracht. Zie ook *orkestklok*.

- **klokspijs** zie *klokkenbrons*.
- **kloksteller**

Een technicus die belast is met het onderhoud van het torenuurwerk.

- **knooplijn**

Een lijn op het klokoppervlak waar de wand tijdens het trillen in rust blijft. Er zijn knoopcirkels en knoopmerdianen.

- **kop**

Het bovenste deel van de klok. Via de *schouder* gaat de kop over in de *flank*.

- **koude loop**

Vroegtijdig gestold brons in de gietvorm waardoor aldaar de onderlinge hechting van het brons verloren gaat.

- **kroesoven**

Een smeltoven waarin het te smelten brons in een uit grafiet gemaakte kroes tot smelten wordt gebracht. Men realiseert dit door de kroes met brandende en gloeiende cokes of houtskool te omringen dan wel door olie- of gasvlammen rondom de kroes te laten circuleren.

- **kroon**

Een open structuur gelijkend op een kroon bestaande uit gewoonlijk zes kroonarmen en een middendeel, de *stapel*. De klok wordt aan de kroon opgehangen.

- **krukluidas**

Een luidas waarvan het draaipunt ter hoogte van de *bovenflank* ligt waardoor niet al het gehele klokgewicht aan de onderzijde van de luidas hangt (zie *rechte luidas*). Bij een juist gekozen *luidklepel* zal de klok in haar uiterst stand aan de onderzijde door een vallende klepel getroffen worden. De verticale afstand van draaipunt tot aan het hoogste punt van de klok, dus de onderzijde van het middendeel van de luidas, noemt men *onderzetting*.

- **kwint** zie *octaafklok*.
- **lantaarntoorn**

Een geheel open doorgaans houten klokkenkamer gelijkend op een lantaarn.

- **lettermatrijs** zie *matrijs*.
- **letterrand**

De band tussen *sierringen* rondom de bovenflank waarin een *opschrift* wordt geplaatst. Doorgaans is dat de naam van de gieter en het jaartal.

- **lichten**

De mantel van de kern aflichten dan wel het omhoog drukken van de mantel door de opwaartse druk van het vloeibare brons.

- **lichter** zie *trommelklavier*.
- **lichterbed** zie *trommelklavier*.
- **lip**

De onderrand van de klok.

- **luiden**

Een luidklok zodanig heen en weer te laten schommelen dat de *luidklepel* de klok telkens in haar uiterste stand aanslaat.

- **luidarm**

Een houten balk aan een luidas zodat deze in schommelende beweging kan worden gebracht. De luidarm is de primitieve voorloper van het *luidwiel*.

- **luidhoek**

De grootste hoek die de klok tijdens het luiden ten opzichte van de verticaal maakt.

- **luidklok**

Een klok die door in schommelende beweging te brengen door de klepel wordt aangeslagen.

- **luidklepel**

Een gewoonlijk uit smeedstaal vervaardigde *klepel* die zich taps naar beneden verbreedt met daarin een duidelijk geprononceerde klepelbol. Het gewicht bedraagt gewoonlijk 4% van het klokgewicht.

- **luidtempo**

Het aantal aanslagen per minuut.

- **luidtouw**

Touw bevestigd aan de *luidarm* dan wel om het *luidwiel* gewonden zodat de luidklok in schommelende beweging kan worden gebracht.

- **luidwiel**

Een wiel dat aan de luidas is bevestigd en waarover het *luidtouw* loopt.

- **majeurklok** zie *grote terts-klok*.
- **mal** zie *sjablone*
- **mantel**

De vuurvaste contramal van de buitenzijde van de te gieten klok.

- **materiaaldemping** zie *inwendige demping*.
- **matrijs**

Houten of metalen matrijs waarin letters of versieringen in spiegelschrift zijn uitgesneden zodat de wasafdrukken die daarin gemaakt worden, als positief tevoorschijn komen.

- **meetrekkende veer** zie *compensatieveer*.
- **melodisch gelui**

Twee of meer luidklokken die een diatonische reeks vormen, bijvoorbeeld c – d – e. Er bestaan ook *harmonische* geluien.

- **metaalkammetje** zie *gietkammetje*.
- **metaalkwart** zie *secundaire slagtoon*.
- **middengat**

Gat in het midden van de kop van een klok zonder kroon. Door dit gat wordt de ophangbout gestoken.

- **middentoonstemming**

Stemming die gekenmerkt wordt door het feit dat vier kwinten gelijk zijn aan twee octaven (2400 cents) plus een reine grote terts (386 cents). Een middentoonkwint is derhalve 696½ cents. De navolgende kwinten worden volgens die waarde voor muziekinstrumenten met vaste tonen gekozen: es – bes – f – c – g – d – a – e – b – fis – cis – gis. Het interval gis – es wordt *wolfskwint* genoemd. In feite is het een verminderde sext.

- **mixtuurtonen**

De partialen hoger dan de partiaal het *octaaf*. Ze dragen bij aan de klankkleur van de klok.

- **model**

Hieronder verstaat men doorgaans de uitwendige vorm van een *klok*. Zie aldaar en ook onder *profiel*.

- **mond**

De open onderkant van een klok.

- **mondingeffect** zie *bim-bam*.
- **muziekband** zie *speelband*.
- **nachtuitschakeling**

Het uitschakelen van het *automatisch spel* gedurende de nacht.

- **niet-octaafklok**

Klok waarin het interval grondtoon – slagtoon geen octaafinterval is. De bekendste typen zijn de sext-, septiem- en noonklok.

- **noonklok** zie *niet-octaafklok*.
- **nootje**

Stift die in de *speeltrommel* wordt gestoken met als doel tijdens het ronddraaien van die trommel een tuimelaar te laten kantelen waardoor de *speelhamer* omhoog getrokken wordt om vervolgens tegen de klok te vallen.

- **notenbak**

Een houten bak waarin de *nootje*s gesorteerd bewaard worden.

- **octaaf** zie *octaafklok*.
- **octaafklok**

Een klok waarvan de laagste vijf partialen de relatieve reeks c^1 - c^2 - es^2 - g^2 - c^3 vormen. Deze partialen dragen de eigennamen *grondtoon*, *priem*, *kleine terts*, *kwint* en *octaaf*. De *slagtoon* van deze klok is c^2 die echter niet dezelfde is als de priem c^2. Vooral in *luidklokken* kunnen grote afwijkingen tussen de partialen voorkomen, in het bijzonder voor de priem, tot meer dan een halve toon. Zie ook *niet-octaafklok*. Boven het octaaf bevinden zich de minder belangrijke partialen, gewoonlijk volgens de toonreeks e^2 - f^2«- f^2» - g^2 - a^2 - b^2 – c^3». Hierin staat – voor een kleine verlaging en + voor een kleine verhoging. Deze boventonen worden achtereenvolgens genoemd grote deciem, eerste undeciem, tweede undeciem, duodeciem, grote tredeciem, grote kwartdeciem en dubbeloctaaf.

- **octaafregel** zie *slagtoon*.
- **oefenklavier** zie *studieklavier*.
- **omzetten**

Het door elkaar mengen van het gesmolten brons in de oven, van vormmateriaal enz.

- **onderzetting** zie *krukluidas*.
- **ontzweven**

Het aanbrengen van verticale groeven aan de binnenkant van de klok teneinde een asymmetrie in de omtrek te corrigeren en daardoor een *zweving* in een bepaalde *partiaal* te elimineren. Ontzweven geschiedt vrijwel uitsluitend voor de *grondtoon*.

- **open klokkenkamer**

Een klokkenkamer die volledig open is, bijvoorbeeld een lantaarntoren.

- **opflikken**

Het schoonmaken en herstellen van de binnenwand van de oven.

- **ophangbout**

IJzeren bout waaraan een klok wordt opgehangen.

- **opkomer**

Een ontluchtingskanaal op de klok dat groter in doorsnede is dan de *windpijp* en dat geacht wordt de nog vloeibare klok in de gietvorm tijdens het stollen van extra brons te voorzien.

- **opschrift**

Een opgegoten tekst op de klok, bijvoorbeeld een naam op de flank. Zie ook *randschrift*.

- **opstoten**

Als gevolg van gassen in het brons het met kracht uit de vorm drijven van kleine hoeveelheden vloeibaar brons.

- **orgelpedaal** zie *Hollands pedaal*.
- **orkestklok**

Een meestal dunne klok die de echte klok op het concertpodium moet vervangen. Ook gebruikt men wel een *klokplaat*.

- **overzettuimelaar**

Een tuimelaar die ervoor zorgt dat de richting waarin een draad loopt, parallel verplaatst wordt.

- **oxide-insluiting**

Onregelmatig gevormde insluitingen van koperoxiden maar ook wel van slakken.

- **partiaal** zie *boventoon*.
- **patina**

Koperoxides en andere chemische verbindingen met het koper uit het brons die een beschermende doorgaans groene laag over het oppervlak vormen. Bij klokken springt die laag er door de trillingen in de klokkenwand regelmatig af.

- **polen**

Met een groene berkenstam door het gesmolten brons roeren. Daarbij komen waterstof, waterdamp en koolwaterstofverbindingen vrij die een sterk reducerende werking op eventueel aanwezige koperoxiden hebben. Bovendien kunnen door de heftige beroering waarin het bad raakt, slakken en andere ongerechtigheden naar boven komen.

- **ponsapparaat**

Een apparaat waarmee in de *speelband* de gaatjes geponst worden overeenkomstig het patroon van de muziek.

- **poreusheid**

Een concentratie van vele kleine *gietgallen*.

- **priem** zie *octaafklok*.
- **primaire slagtoon** zie *slagtoon*
- **principe van de dynamische gelijkvormigheid**

Indien een klok in al haar afmetingen f maal zo groot wordt gemaakt als een andere klok, zal die klok een frequentie bezitten die 1/f maal zo klein is als die andere.

- **profiel**

Een tekening van de doorsnede van de klok, strikt genomen de halve doorsnede.

- **profielprogressie**

De relatieve toename van de wanddikte van klokken uit een beiaard naarmate ze hoger van toon worden.

- **pythagoreïsche stemming**

Een stemming waarbij de kwinten uit de reeks es – bes – f – c – g – d – a – e – b – fis – cis - gis een waarde hebben van 702 cents hetgeen overeenkomt met een frequentieverhouding van 3/2.

- **rakelijzer**

Een rechthoekig omgebogen stuk ijzer aan een lange houten steel dat dient om het smeltbad om te roeren, af te schuimen enz.

- **rammel** zie *speeltrommel*.
- **randschrift**

Een tekst die geheel of gedeeltelijk rondom de klok loopt, doorgaans op de *bovenflank* maar dikwijls ook in de *faussure*.

- **randversiering** zie *sierrand*.
- **reactiekrachten**

Horizontale en verticale krachten die tijdens het luiden van de klok op de toren worden uitgeoefend.

- **rechte luidas**

Luidas waarvan de draaiingsas door de bovenzijde van de kroon gaat. De *onderzetting* is daarom nul. Bij een goed gedimensioneerde luidklepel wordt de klok in haar uiterste aan de bovenkant getroffen. Men spreekt dan van *vliegende klepel*. Zie ook *krukluidas*.

- **reine stemming**

Stemming waarbij de frequentieverhouding tussen twee diatonisch tonen door gehele getallen bepaald wordt, bijvoorbeeld een kwint c – g met 3/2.

- **rektrilling**

Indien een staaf op de kopse kant wordt aangeslagen en derhalve een longitudinale trilling tot stand komt, spreekt men van een rektrilling omdat geen buigingen optreden, zoals bij een *buigtrilling*, doch uitsluitend rek.

- **repetitieveer**

Veer achter de klepel die de klepel na aanslag onmiddellijk weer terugtrekt zodat snel repeteren mogelijk is.

- **retrograde luidsysteem**

Een luidsysteem met een *krukluidas* en een *luidklepel* waarvan het draaipunt zoveel lager ligt, dat die van een contragewicht kan worden voorzien. Het effect is dat de klepel, ondanks de krukluidas, niettemin *vliegend* is.

- **rib**

Na het voltooien van de kern wordt ten behoeve van de valse klok de klokdikte van de houten *sjablone* weggenomen. Dit stuk lijkt bedrieglijk veel op een rib.

- **rijzelen**

Het korrelig worden van de vormwanden, bijvoorbeeld van het kernoppervlak.

- **ruststand**

Bij het *wisselluiden* staan de klokken die op hun beurt moeten wachten met de *mond* naar boven gericht, dus op de kop.

- **scheepsbel**

Gewoonlijk een *bel*, doch in meer fraaie uitvoeringen een klok met versiering en opschriften.

- **schachtoven**

Een voor brons verouderd type bestaande uit een vuurvaste cilinder waarin afwisselend houtskool en brons werd gestapeld. Door middel van blaasbalgen kan een zodanig fel vuur tot stand gebracht worden dat het brons gaat smelten. Het vloeibare brons wordt aan de onderzijde afgetapt door een lemen prop uit de ovenmond te stoten (*afsteken*).

- **schouder**

De overgang van de min of meer verticale *flank* naar de *kop*, het bovenste deel van de klok.

- **schuifnootje**

Een nootje dat door te verschuiven elke gewenste positie op de speeltrommel gegeven kan worden en zulks in tegenstelling met het *vaste nootje*.

- **schuine hoogte**

De rechte afstand van de *lip* van de klok tot aan de *schouder*.

- **secundaire slagtoon**

Ook wel bekend onder de naam *slagtoonkwart* omdat deze doorgaans een undeciem hoger is dan de primaire slagtoon.

- **septiemklok** zie *niet-octaafklok*.
- **sextklok** zie *niet-octaafklok*.
- **sierrand**

Een repeterende ornament tussen twee horizontaal lopende *sierringen* rondom de *bovenflank* van de klok.

- **sierring**

Een smalle verhoogde ring rondom de klok.

- **sjablone**

De houten of aluminium mal waarmee de kern of de valse klok wordt gedraaid.

- **slag**

Oorspronkelijk de dikte van de slagring; later gedefinieerd als een bepaald deel van de *diameter*, bijvoorbeeld het vijftiende deel. Alle maten van een *profiel* worden in slagen uitgedrukt.

- **slagring**

Het dikste deel van de klok waartegen de *klepel* of *hamer* slaat.

- **slagtoon**

De fysiologische toonhoogtegewaarwording op het moment van aanslag van de klok. Deze toonhoogte is niet identiek met een partiaal, doch is volgens een vuistregel altijd een interval van één octaaf lager dan de vijfde partiaal het octaaf (octaafregel). In werkelijkheid is de slagtoon een periodiciteitstoon die gevormd wordt door de partialen octaaf, duodeciem en het dubbeloctaaf.

- **slakken**

Metaaloxides en andere niet-metallische stoffen die tijdens het smelten op het bad drijven. Deze worden vlak voor het gieten verwijderd.

- **slink**

Een gietfout bestaande uit niet volledig gevormde kristallen waarvan de boomstructuur duidelijk zichtbaar blijft.

- **sluitrand**

Een schuine rand aan de onderzijde van de kern waar omheen de onderzijde van de mantel past zodat kern en mantel niet scheef ten opzichte van elkaar gepositioneerd worden.

- **smeltoven** zie *kroesoven, schachtoven* en *vlamoven*.
- **smeltverlies**

Het percentage brons dat tijdens het smelten en gieten verloren gaar, voornamelijk door verbranding. Het smeltverlies ligt in de orde van grootte van 4%.

- **smelttemperatuur**

Temperatuur waarbij een metaal of legering smelt. Zie ook giettemperatuur.

- **sordino-inrichting**

Een mechaniek op een *beiaardklavier* waarmee met één handeling de *diepgang* verminderd wordt waardoor de klokken zachter aangeslagen worden. Het systeem wordt niet meer gebruikt.

- **speelband**

Een eindloze band van kunststof waarin gaatjes zijn geponst overeenkomstig de gewenste muziek. Zodra een gaatje een lichter passeert, wordt een stroomkring gesloten waardoor de bijbehorende *elektromagnetische speelhamer* bekrachtigd wordt.

- **speelhamer**

Hamer aan de buitenzijde van de klok die vanuit de speeltrommel omhoog wordt getrokken om vervolgens als *vrijvallende* hamer de klok aan te slaan. Zie ook *elektromagnetische speelhamer*.

- **speelklok** zie *beiaardklok*.
- **speeltafel** zie *beiaardklavier*
- **speeltrommel**

Een doorgaans grote messing of gietijzeren wals waarin voor elke *speelhamer* een baan met gaatjes is aangebracht waarin stiften, *nootjes* genaamd, gestoken kunnen worden. Zodra tijdens het draaien van de trommel een nootje de bijbehorende *lichter* uit het *trommelklavier* laat kantelen, wordt de hamer van de klok gelicht. Na passeren van het *nootje* valt de hamer op de klok, doch wordt daarbij onmiddellijk van de klok afgeduwd door een lange *bladveer*. Een trommelmaat, dat wil zeggen de afstand tussen twee gaatjes, wordt doorgaans door nootjes met bruggen van verschillende lengtes in achten ingedeeld. Die boven het gaatje is de eerste tel en heet daarom eentje. Het tweetje is een achtste verder, een drietje een kwart enz. Het achtje is zeven achtste noten van het eentje verwijderd en een achtste van de volgende trommelmaat.

- **spil**

De verticale spil waaraan de om de vorm draaiende *sjablone* is bevestigd.

- **springtrommel**

Een *speeltrommel* met een dubbel aantal banen waarbij het *trommelklavier* door één baan naar links of rechts te verspringen de banen met uitsluitend even of oneven rangnummers gebruikt. Er kan derhalve dubbel zoveel muziek op een springtrommel.

- **staalstralen**

Onder hoge druk staalkorrels tegen een klok spuiten waardoor die van ongerechtigheden kan worden ontdaan, bijvoorbeeld restanten vormmaterialen. Ook worden wel slakken gebruikt. Met het oog op de gevaren voor de gezondheid is zand tegenwoordig verboden (zie *zandstralen*).

- **stamper**

Bedoeld om vormaarde aan de stampen. Men kent twee typen. De spitsstamper is een houten of ijzeren stang met aan de onderkant een dwars geplaatst afgerond stuk ijzer. De platstamper heeft aan de onderkant een rond of vierkant plaatje ijzer. Soms ook is de stamper geheel van ijzer met aan de onderzijde een grotere cilindrische doorsnede.

- **stapel**

Middenstijl van de klassieke *kroon* waarin het *klepeloog* wordt vast gegoten.

- **starre luidklepel**

Een luidklepel die zich ten opzichte van de luidende klok niet beweegt.

- **stembank**

Carrouseldraaibank waarop grotere klokken tijdens het *stemmen* worden uitgedraaid.

- **stemgrafiek**

Een grafiek waarin voor een bepaalde partiaal wordt aangegeven hoeveel cents die partiaal stijgt of daalt indien aan de binnen- of buitenzijde van de klok op een bepaalde plaats brons wordt weggenomen.

- **stemmen**

Door aan de binnenzijde van de klok op daartoe noodzakelijke plaatsen brons weg te draaien totdat de vijf laagste *partialen* het gewenste akkoord vormen. Hogere *boventonen* worden niet gestemd.

- **stemming**

De toonstructuur van een klank waarbij de afwijkingen ten opzichte van de normaaltonen in *zestienden* of *cent*s worden gegeven.

- **stemvork met loopgewichten**

Een stemvork met op elk been een verplaatsbaar gewicht zodat de toonhoogte van die stemvork gewijzigd kan worden. Op een van de benen is een schaal aangebracht. Wordt de voet van de stemvork op de klok geplaatst en

de frequentie van de stemvork komt overeen met die van een van de partialen dan zal de klok in die bepaalde partiaal resoneren.

- **stokkenklavier** zie *beiaardklavier*.
- **stookgat**

De opening in de vuurhaard van de *vlamoven* waardoor het hout wordt geladen.

- **stopbalk**

De stopbalk in de klokkenstoel voor het *wisselluiden* zorgt ervoor dat de klok niet de volle zwaai maakt, dus 360 graden, doch de klok afremt zodra deze op zijn kop staat.

- **stopstang**

Een ijzeren staaf met aan het uiteinde een omgekeerd bevestigde ijzeren kegel. Deze wordt gebruikt om het gietkanaal gesloten te houden totdat de gietkom met voldoende brons is gevuld. Ook wordt hij wel gebruikt om ervoor te zorgen dat geen zand in de vorm valt.

- **strobometer**

In deze toonmeter, meer bekend onder de naam strobotuner, bevindt zich een speciaal ontworpen roterend schijfje dat op een willekeurige hoeksnelheid kan worden ingesteld. Neonlampen achter het schijfje gaan synchroon aan en uit in de frequentie van de toon die gemeten wordt. Zodra door wijziging van de snelheid van het schijfje het aan en uit gaan gesynchroniseerd is op de hoeksnelheid van het schijfje, zullen de daarop afgetekende figuren stil lijken te staan. Het verschijnsel bezit overeenkomst met de stilstaande spaken van een in een film bewegend rijtuig, wanneer het aantal filmopnamen per minuut hetzelfde is als het aantal voorbij draaiende spaken per minuut.

- **studieklavier**

Een klavier waarop de beiaardier thuis studeert. Het is een *beiaardklavier* dat niet met klokken is verbonden, doch waarin als klankbron doorgaans een metallofoon is ingebouwd.

- **suikerbroodmodel**

Klokmodel met sterke gelijkenis met het slanke en hoge suikerbrood.

terts zie *octaafklok*.

- **toetscompensatie**

Een veer onder een toets die ervoor zorgt dat de toets in rusttoestand geen tegendruk geeft.

- **toetsdraad**

In de toets-klepel verbinding de draad die aan de toets is bevestigd.

- **toongenerator**

Een elektrisch apparaat waarmee een wisselspanning van gewenste *frequentie* gemaakt kan worden.

- **tractuur**

Het type mechanische verbinding tussen klavier en klepels. Zie *broeksysteem* en *tuimelaarsysteem*.

- **trekmal** zie *sjablone*.
- **trillingstijd**

De tijd in seconden voor het maken van een volledige trilling. Zie ook *frequentie*.

- **trillingsvorm**

De wijze waarop de klokkenwand tijdens het trillen periodiek vervormt waarbij *knopen* en *buiken* de desbetreffende trilling karakteriseren.

- **tripeloctaaf**

De partiaal die in een *octaafklok* drie octaven boven de *slagtoon* ligt.

- **trommelklavier**

De rij tuimelaars voor de *speeltrommel* die met de *speelhamers* zijn verbonden.

- **trommelmaat**

Op een trommel voor *vaste nootjes* de afstand tussen twee horizontale rijen gaatjes.

- **trommelspeelwerk** zie *speeltrommel*.
- **tuimelaarsysteem**

Een mechanische verbinding tussen toets en klepel. Aan een horizontale draaibare as zijn twee armen bevestigd. Aan de horizontale arm wordt de verticale toetsdraad vastgemaakt, aan de verticale arm de horizontale klepeldraad. Door de beide armen op verschillende plaatsen aan de as te bevestigen, behoeft de toetsdraad niet in hetzelfde vlak te liggen als de klepeldraad. Meerdere tuimelaarassen kunnen in een rek verenigd worden.

- **tuimelklepel**

Een nauwelijks nog gebruikt systeem waarbij de klepelsteel van een klepel rechtstreeks op de tuimelaaras is gemonteerd. Daarmee vervalt de horizontaal lopende klepeldraad.

- **tweetje** zie *vast nootje*.
- **uitbreken** zie *uitlopen*.
- **uitdraaien**

Op een draaibank of carrouselbank een klok aan de binnenkant plaatselijk verdunnen teneinde de juiste toonstructuur te realiseren.

- **uitklinktijd**

De tijd in seconden die een *partiaal*, in het bijzonder de *grondtoon*, te horen is. Gewoonlijk wordt deze op het gehoor vastgesteld door dichtbij de *faussure* naar de klok te luisteren. Een vuistregel zegt dat de uitklinktijd van de grondtoon minstens 0,7 maal de doorsnede in centimeters moet zijn. In wetenschappelijk onderzoek wordt de uitklinktijd gedefinieerd als de tijd waarin het geluidsniveau met 60 dB is afgenomen.

- **uitlopen**

Het weglopen van het gesmolten brons uit de gietvorm, bijvoorbeeld door een breuk in de vorm of omdat de mantel door het vloeibare brons omhoog wordt gedrukt.

- **uitwas**

Een verhoogde onregelmatigheid op de klokkenwand. Soms kan deze vermengd zijn met vormmateriaal.

- **uitwendige demping**

Ook wel *akoestische demping* genoemd. De afname van de trillingsenergie als gevolg van het afstralen van het geluid.

- **uitwendige stemming:**

de onderlinge stemming tussen de klokken van een beiaard of gelui.

- **undeciem**

Een partiaal die een octaaf plus een kwart boven de *slagtoon* ligt. Er zijn twee undeciemen. Zie *octaafklok*.

- **vallende klepel** zie *krukluidas*.
- **valse klok**

Een stadium in het vormproces waarin een exact model van de te gieten klok wordt gemaakt in leem of zand met daaroverheen was en wassen letters en ornamenten.

- **vast nootje**

Een nootje dat in tegenstelling met het *schuifnootje* slechts voorgeschreven posities op de *speeltrommel* kan innemen. Een *trommelmaat* wordt doorgaans met acht vaste nootjes overbrugd. Die op de eerste tel heet een eentje, op de tweede tel een tweetje enz.

- **vast punt** zie *broeksysteem*.
- **verdeelschijf**

Wanneer tijdens het versteken de *speeltrommel* voor *schuifnoten* handmatig wordt doorgedraaid, kan de beiaardier op de verdeelschijf zien hoeveel maatdelen hij de trommel verdraait.

- **verloren tuimelaar**

Een *tuimelaaras* met twee horizontale armen aan dezelfde zijde waarvan een over de as verschuifbaar is. De verloren tuimelaar heeft tot doel om de verticale draad die vanaf de *speeltrommel* omhoog komt, recht onder de speelhamer te brengen. Het systeem wordt niet meer gebruikt.

- **verloren was-methode**

Ook wel cire perdue-techniek genoemd. Een vormmethode waarbij het te gieten voorwerp in was wordt gemodelleerd waarna het vervolgens in vuurvast materiaal wordt ingekapseld. Na verharding wordt de was eruit gesmolten. In de aldus ontstane holle ruimte wordt het brons gegoten.

- **verpikken**

De klavier- of klepeldraad in een ander gaatje van de tuimelaar bevestigen.

- **verschuifbare noten** zie *schuifnoten*.
- **verschiltoon**

Subjectieve toon met een frequentie die gelijk is aan het verschil in frequentie tussen twee sterk klinkende tonen.

- **versteeklat**

Deze wordt vóór de *speeltrommel* gelegd teneinde te zien welke trommelbaan bij welke *speelhamer* behoort.

- **versteken**

De *nootje*s in een andere configuratie op de *speeltrommel* bevestigen ten behoeve van een andere melodie.

- **versieringsmatrijs**

Houten of metalen matrijs waarin de versiering in negatief is uitgesneden zodat de wasafdrukken die daarin gemaakt worden, positief tevoorschijn komen.

- **vervangingslegering**

Een goedkope en gemakkelijk verkrijgbare legering die de kwaliteiten van het klokkenbrons evenaart. Ondanks vele pogingen is een dergelijke legering nooit gevonden.

- **viertje** zie *vast nootje*.
- **Vlaams pedaal**

Pedaal waarvan het draaipunt aan de achterzijde van het klavier ligt, dus vóór de speler.

- **vlamoven**

Een smeltoven waarin door de smelthaard vlammen wordt geleid die het gewelfvormig plafond dusdanig verhitten dat het brons door stralingswarmte gaat smelten. De brandstof kan zowel hout als olie zijn. De met hout gestookte vlamovens werken gewoonlijk op natuurlijke trek.

- **vliegende klepel** zie *rechte luidas*.
- **vloeimiddel** zie *flux*.
- **vlucht**

Het staartstuk van een klepel. Bij een beiaardklepel is die vrijwel nihil. Bij een luidklepel voor een rechte as is hij aanzienlijk langer dan bij een klepel voor krukas.

- **voorslag**

Een reeks klokken met een omvang van minder dan 1½ octaaf waarop doorgaans alleen maar automatische muziek ten gehore wordt gebracht.

- **vormstift**

Een dunne ijzeren stift met een lengte van minder dan tien centimeter waarmee een los vormdeel wordt vastgezet.

- **vormplaat of vormtafel**

Een ronde ijzeren schijf waarop als ronddraaiend de vorm gemaakt wordt. De *sjablone* is in dat geval vast opgesteld, terwijl de vorm ronddraait.

- **vrijvallende speelhamer**

Een *speelhamer* die, na opgelicht te zijn, wordt losgelaten en vervolgens door zijn eigen gewicht tegen de klok slaat.

- **wanddikte**

De dikte van de klokkenwand, gewoonlijk als gemiddelde flankdikte.

- **waterkering** zie *domperrek*.
- **windpijp**

Een smal verticaal kanaal op het hoogste deel van de gietvorm waardoor de (brandende) gassen kunnen ontsnappen die tijdens het gieten in de vorm ontstaan.

- **wisselluiden**

Volgens bepaalde patronen (wiskundige permutaties) een serie *luidklokken* of *handbellen* steeds weer volgens een iets andere reeks laten klinken door bijvoorbeeld telkens twee klokken in de volgorde van aanslag te verwisselen.

- **wolfskwint**

In de *middentoonstemming* de oneigenlijke kwint gis – es die 42 cents te klein is en eigenlijk een verminderde sext is. Op een orgel geeft dit aanleiding tot ernstige zwevingen; vandaar de naam.

- **zandstralen**

Onder hoge druk zandkorrels tegen een klok spuiten waardoor die van ongerechtigheden kan worden ontdaan, bijvoorbeeld restanten vormmaterialen. Met het oog op de gevaren voor de gezondheid is zand tegenwoordig verboden en wordt staal gebruikt (zie *staalstralen*).

- **zestiende van een halve toon**

Verouderde eenheid voor het meten van toonafwijkingen. Eén zestiende staat gelijk aan 6¼ cent.

- **zwarten**

Grafiet of gezeefde as, aangemaakt met water of bier, met een penseel op de vorm aanbrengen. Zie ook *deklaag*.

- **zweving**

Het enigszins in toonhoogte en toonsterkte op- en neergaan van twee dicht bij elkaar liggende tonen, bijvoorbeeld twee *grondtonen* als gevolg van een asymmetrie in de omtrek van de klok.

- **zwevingsvrij punt**

Een punt in de omtrek van de slagring waar de klok kan worden aangeslagen zonder dat de desbetreffende partiaal zweeft.

14 REGISTER

Zie ook de woordenlijst.

aanslagpunt 32f
afvalhoogte speelhamer 137
akoestiek klokkenkamer 143ff
akoestische demping ->
uitwendige demping
afkoelen 15
afwerking klok 15ff
akoestische isolatie klok 93
automatisch spel 125ff
bandspeelwerk 139f
beiaard 5,81ff
beiaard omvang 81ff
beiaard stemming 88f
beiaard transpositie 82
beiaardklavier 92,121ff
beiaardklepel 106ff
beiaardklok 5
beiaardklokken, afmeting en gewicht 83ff
beiaardstoel 123ff
bekken 129
bim-bam 104f
bladveer 111
bovendruk -> druk klavier
boventonen 19ff
brandstof oven 13
brats 16
Brinell hardheid 59
broekdraad 108
broekpunt 112
broeksysteem 95,108f,126
broeken, meervoudige 113
broodje brons 11
brug 129
Brussels zand 9
buigtrilling 29
buiken en knopen 26f
campana 4
campanologie 4
carillon 5
carrouselbank 50
cementzand-vormmethode 8f
cent 21
chamotte 6,10
cire perdue-techniek 6
cis en dis in de bassen 81
CNC bank 53
combinatienootje 129f
computerspeelwerk 139f
contacttijd klepel 58
contragewicht luidas 103
coquille 6
decibel (dB) 59
deklaag 14
diepgang klavier 121
diffusor 149
dikteregel ontwerpen 42f
ding-dong -> bim-bam
dissonantie twee klokken 77
Doppler-effect 105
draaitafel 6
droogstoken 14
druk klavier 109f
echo’s in klokkenkamer 145f
eigenfrequentie 19
eindige elementen-methode 45f
elektromagnetische hamer 96,138ff,141
elektromagnetisch speelwerk 138ff
evenredige zwevende stemming 71f,92
excitator 24
faussure 4
fD-waarde 85
foon 60
frequentie 19
furaanhars 8
galmborden 145ff
gas in gietvorm 13
gehoorgevoeligheid 65
gelui 75ff,103
gelui stemming 78ff
gerichte tuimelaar 117ff
geschiedenis campanologie 4
gesloten klokkenkamer 143ff
gewichtsprogressie 84ff
gieten 12ff
gietfouten 16ff
gietgal 16f

gietkom 11
gietkwaliteit 63
gietpan 13
giettap 16
giettemperatuur 11
Glorioa-motief 77
Gloria Te Deum-motief 77
groepenindeling partialen 25ff
grondtoon en boventonen 19ff
grote terts-klok 20f,67f
halfuurklok 95
hals 129
hamer 5,96
hamer met overstekende steel 95f,126
hamers, aantal in beiaard 132
handluiden 100
harmonische geluien 76f
harmonischen 19ff
hardheid klepel en hamer 59,96
hinderwet 149
hoorbaarheid op afstand 59ff
inwendige demping 63f
kern 7ff
klank en toon klok 19ff
klankanalyse klok 28
klankanalysator 24,58
klankkleur 19,64f
klankmenging klokkenkamer 143f
klankstructuur klok 20ff
klavierdraad 108
klepel 5
klepel zijdelingse beweging 108
klepeldraad 108
klepelhoek 107f
klepel en klank 58ff
klepelgewicht 107
klepeloog 14,108
klepelweg 109ff
klik 127
klok, definitie 4
klokformule 85
klokkenbrons 4,11,62ff
klokkenkamer, weerkaatsing geluid 143ff
klokkenspel -> beiaard
klokkenstoel 123ff,127f
klokspijs 11
knopen en buiken 26ff,32
kokerbalk 93
kritieke band 53f,66,76
kroesoven 11
kroon 5,10
krukluidas 98ff
leem 8
lichter 125f
lichterbed 125
lood in klokkenbrons 63
loopgewicht 22
luidas 97ff
luidhoek 100
luidklepel 97f
luidklok 5
luidklokken, afmetingen en gewichten 74
luidmotor 100
luidtempo 99ff
luisterrichting 33f
mantel 10ff
materiaaldemping -> inwendige demping
matrijs 9
mechanisch spel -> trommelspeelwerk
meetinstrumenten 22ff
melodische geluien 75f
metaalkammetje 16
metaalkwart -> slagtoon
microporeusheid 17
middengat 14
middentoonstemming 70f,91
nauwkeurigheid meten 25
nauwkeurigheid stemmen 51f,78ff,89ff
niet-octaafklokken 65f
mondingeffect 105
muziekband 139f
nagalmtijd klokkenkamer 143f
noonklok -> niet-octaafklokken
nootje 129ff
octaafklok 20
omhoog stemmen 52
onderdruk -> druk klavier
onderzetting 98fff
ontwerpen 41ff
ontzweven 56f
open klokkenkamer 146,149
ophangbalk 93f
ophanging klok 94
opkomer 11,16
opluihoogte 99
opschrift 9

opstoten 13
optimalisatie broeksysteem 113
optimalisatie profiel 45f
optimalisatie stemmen 53
opwaartse druk 15
ornament 10
partialen 19f
pedaal klavier 121
periodiciteitstoon 37ff
poreusheid 17
primaire slagtoon -> slagtoon
principe van de dynamische gelijkvormigheid 73ff
profielvariaties ontwerpen 44ff
pythagoreïsche stemming 91f
reactiekrachten luidklok 98
rechte luidas 97ff
reine stemming 70
rektrilling 29
repetitieveer 111f,116f
residutoon 38
resonantie toren bij luiden 99
ritardando 134,136
Salve Regina-motief 77
schacht luidklepel 97
schuifnoot -> verschuifbare nootjes
secundaire slagtoon -> slagtoon
septiemklok -> niet-octaafklokken
sextklok -> niet-octaafklokken
sierring 9
sjablone 6ff
slaghamer 95
slagtoon 4,20,36ff
slak 13,15
slink 17
sluitrand 8,15
smelttemperatuur 11
speelklok -> beiaardklok
spil 8
staalstralen 15
stalen klok 63f
steekapparaat 140
stembank 50
stemgrafieken 47ff
stemmen klok 46ff
stemmingen 70ff
stemreserve 46
stemvork 22ff
stethoscoop 26
stokkenklavier -> beiaardklavier
strobometer 24
stroboscopisch effect 24
Te Deum-motief 77
temperatuurgevoeligheid klok 57f
timbre -> klankkleur
tingehalte 62
toongenerator 23
toonstift -> nootje
tractuur 4
tractuur beiaard 106ff
tractuur slagklok 93ff
trekker -> lichter
trekmal -> sjablone
trillingsfiguur 26ff
trillingstijd (periode) 26
triool 134
trommel, omlooptijd 133ff
trommelaandrijving 127
trommelklavier -> lichterbed
trommelmaat 143
trommelspeelwerk 125ff
tuimelaarsysteem 95f,115ff
tuimelklepel 120f
uitgebalanceerde tuimelaar 118f
uitklinken klok 30ff
uitklinktijd 32,62f
uitwas 18
uitwendige demping 63f
uurklok 95
valse klok 9ff
vaste nootjes 129
veer 111f,116f
verdeelschijf 136
verloren was-techniek 6
verminderd septiem-akkoord 91
verontreinigingen klokspijs 63
verschiltoon 34ff
verschuifbare nootjes 133ff
versteeklat 142,135
versteken 129
verstrooiing geluid klokkenkamer 144ff
vierkante gaten trommel 129
vlamoven 11ff
vlucht luidklepel 97
vormen en gieten 6ff
voorslag 5

was 9
weglengte slaghamer 96
windpijp 11
windrichting en klok 61f
wolfskwint 71
zandklok 9
zandstralen 15
zandvormmethode 6
zestiende van halve toon 23
zestienden op speeltrommel 134
zwevingen 54ff

15 INHOUD

1 VOORWOORD 3
2 INLEIDING 4
2.1 Doel van het boek 4
2.2 Enkele definities en begrippen 4
3 HET VORM- EN GIETPROCES 6
3.1 Algemene beschrijving van het proces 6
3.2 De werkopstelling 6
3.3 De kern 7
3.4 De valse klok 9
3.5 De mantel 10
3.6 De smeltoven 11
3.7 Het gietklaar maken en het gieten 13
3.8 De afwerking van de klok 15
3.9 Gietfouten 16
4 KLANK EN TOON VAN DE INDIVIDUELE KLOK 19
4.1 De grondtoon en zijn boventonen 19
4.2 Meetinstrumenten 22
4.3 Classificatie van boventonen 25
4.4 Enkele muzikale consequenties 30
4.5 Verschiltonen in de klokkenklank 34
4.6 De primaire en secundaire slagtoon 36
4.7 Het ontwerpen van de klok 41
4.8 Het stemmen van de klok 46
4.9 Zwevingen in de klokkenklank 54
4.10 Temperatuur en toonhoogte 57
4.11 De invloed van de klepel op de klank 58
4.12 De hoorbaarheid van de klok 59
4.13 Het klokkenbrons 62
4.14 De klankkleur van de klok 64
4.15 Niet-octaafklokken 66
4.16 De grote terts-klok 67
5 TOONSTELSELS 70
5.1 De reine of natuurlijke stemming 70
5.2 De middentoonstemming 70
5.3 De evenredig zwevende stemming 72
6 GELUIEN 73
6.1 Het principe van de dynamische gelijkvormigheid 73
6.2 Typen geluien 75
6.3 De stemming van geluien 78
7 DE BEIAARD 81
7.1 Algemene oriëntering 81
7.2 Afmetingen van speelklokken 83
7.3 Speelklokken en toonstelsels 88
7.4 Hoe nauwkeurig moet een beiaard gestemd worden? 89
8 DE TRACTUUR VAN DE SLAGKLOK 93

8.1 De ophanging van de klok 93
8.2 De tractuur van de slagklok 95
9 DE TRACTUUR VAN DE LUIDKLOK 97
9.1 Typen luidassen 97
9.2 Aanslagtempo's 100
9.3 Praktische toepassingen 103
9.4 Het bim-bam effect 104
10 DE TRACTUUR VAN DE BEIAARD 106
10.1 De speelklepel 106
10.2 Het broeksysteem 108
10.3 Het tuimelaarsysteem 115
10.4 De gerichte tuimelaar 117
10.5 De tuimelklepel 120
10.6 Het beiaardklavier 121
10.7 De bouw van een beiaard 123
10.8 Het trommelspeelwerk 126
10.9 Het versteken met vaste nootjes 129
10.10 Het versteken met verschuifbare nootjes 134
10.11 Het elektromagnetisch speelwerk 137
10.12 Het computerspeelwerk 140
11 DE INVLOED VAN DE KLOKKENKAMER OP DE KLANK 143
11.1 Enkele theoretische grondslagen 143
11.2 De echowerking van de klokkenkamer 145
11.3 Galmborden 147
11.4 De open klokkenkamer 149
12 LITERATUUR 150
12.1 Over de geschiedenis van klok en beiaard: 150
12.2 Over vormen en gieten van klokken 150
12.3 Over de campanologie: 150
12.4 Over de tractuur van luidklok en beiaard: 151
12.5 Over restaureren: 151
13 WOORDENLIJST 152
14 REGISTER 165
15 INHOUD 169